

تحلیل استاتیکی ورق‌ها و مقاطع فولادی تقویت شده با ورق‌های FRP به کمک مدل‌سازی اجزاء محدود

حسین عموشاهی^{۱*}، محمد قاسمی تبار^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- کارشناس ارشد عمران- سازه، گروه عمران، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

امروزه استفاده از کامپوزیت‌های FRP به عنوان روشی نوین برای تقویت اعضای سازه‌های فولادی مورد توجه محققان قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، با انجام مدل‌سازی و تحلیل استاتیکی ورق‌ها و مقاطع فولادی در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS اقدام به ارزیابی مقادیر تغییرشکل‌ها، قبل و پس از تقویت با ورق‌های GFRP گردیده است. نتایج بدست آمده میزان افزایش سختی و ظرفیت باربری صفحات و تیرهای I شکل فولادی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این روش مقاوم‌سازی، با قرارگیری ورق GFRP بر روی بال تیر نتایج بهتری نسبت به حالت چیدمان ورق بر روی جان حاصل می‌گردد. برای ستون‌های فولادی با مقطع توخالی و I شکل مورد بررسی نیز با مقایسه رفتار محوری و جانبی نمونه‌ها قبل و بعد از تقویت، نتایج میزان افزایش سختی محوری و به دنبال آن افزایش ظرفیت حمل بار ستون نسبت به نمونه‌های تقویت نشده را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، تاثیر میزان ناکاملی هندسی اولیه بر کاهش ظرفیت صفحات فولادی تقویت شده و تقویت نشده نیز ارزیابی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد از طریق تقویت صفحات فولادی با ورق GFRP می‌توان میزان حساسیت آن‌ها را نسبت به مقادیر مختلف نقص هندسی اولیه بویژه برای صفحات با نسبت پهنا به ضخامت بالاتر کاهش داد.

کلمات کلیدی: کامپوزیت‌های FRP، تحلیل استاتیکی، اعضای فولادی، تقویت کردن، اجزاء محدود.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.109862.1407	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
Doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2018.109862.1407	۱۳۹۸/۰۶/۱۰	۱۳۹۷/۰۱/۲۹	۱۳۹۷/۰۱/۲۹	۱۳۹۶/۱۲/۲۲	۱۳۹۶/۹/۱۸
حسین عموشاهی h.amoushahi@eng.ui.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

Static Analysis of Steel Plates and Sections Retrofitted with FRP Plates by Finite Elements Modelling

Hossein Amoushahi^{1*}, Mohammad Ghasemitabar²

¹Assistant professor, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

²MSc of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Daneshpajooan Institute of Higher Education, Isfahan, Iran.

ABSTRACT

Nowadays the use of FRP composites for strengthening steel structures has been considered by researchers. In present study, The maximum deformation of steel plates and structural sections before and after strengthening by GFRP plates was evaluated by modelling and static analysis using ABAQUS finite element software. The results indicated the amount of increasing rate in stiffness and load capacity of studied steel plates and I-shaped beams. In this strengthening method, better results would be achieved by installing GFRP plates to the flange of the beam in comparison with installing them to the web of the beam. The results for studied steel hollow sections and I-shaped columns, comparing axial and lateral behaviour of specimens before and after strengthening indicates the increasing rate in axial stiffness and therefore increase in load carrying capacity of columns in comparison with bare specimens. In this research, the influence of geometric imperfection on the reduction of the limit loads of the bare as well as the retrofitted steel plates was also evaluated. The results indicated that the strengthening of steel plates with GFRP plates could be decreased by the sensitivity of them due to presence of initial geometric imperfections, particularly for plates with higher width-to-thickness ratio.

ARTICLE INFO

Receive Date: 09 December 2017

Revise Date: 13 March 2018

Accept Date: 18 April 2018

Keywords:

FRP Composite,
Static analysis,
Steel Members,
Strengthening,
Finite Element

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.109862.1407

*Corresponding author: Hossein Amoushahi

Email address: h.amoushahi@eng.ui.ac.ir

۱- مقدمه

مقاوم سازی در مهندسی عمران به منظور بالا بردن مقاومت سازه همواره اهمیت ویژه‌ای داشته است. با توجه به بروز اشتباهات در طراحی، تغییر در کاربری ساختمان، ضعف در سازه‌هایی که در گذشته و با استانداردهای قدیمی طراحی و بنا شده‌اند و خسارت دیدگی سازه‌ها در اثر بلایای طبیعی و مسائلی از این قبیل، همواره مهندسين ناگزير به استفاده از روش‌هایی به منظور تقویت سازه‌ها بوده‌اند. روش‌های مرسوم برای تقویت سازه‌های فولادی عمدتاً به صورت اتصال ورق‌های فولادی اضافی با پیچ یا جوش می‌باشد که در بیشتر مواقع دارای نواقصی از نظر نحوه اجرا و عمر مفید هستند. بنابراین به نظر می‌رسد یافتن روشی موثر برای تقویت اعضای فولادی، مبتنی بر استفاده از مصالح و تکنیک‌هایی که عمر مفید بالا و هزینه اجرا و نگهداری کمتری دارند امری اجتناب ناپذیر باشد. یکی از این موارد استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف FRP^۱ می‌باشد. از مهم‌ترین مزایای این مواد می‌توان به دارا بودن نسبت مقاومت به وزن بالا، دسترسی نامحدود در شکل و ابعاد، حمل و نقل آسان و مقاومت زیاد در برابر عوامل مخرب محیطی اشاره نمود [۱]. همین مزایا باعث شده تا استفاده از آن‌ها برای تقویت مقاطع فولادی مورد توجه قرار گیرد.

کامپوزیت‌های FRP بیشتر برای تقویت اعضاء بتنی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تلاش‌های مقدماتی پیرامون استفاده از این کامپوزیت‌ها برای مقاوم‌سازی مقاطع فولادی، به تقویت پل‌های فولادی با جوش‌پذیری کم، ترمیم مقاطع دچار خوردگی و نیز ترمیم اتصالات آسیب دیده در اثر خستگی برمی‌گردد [۲]. در سال‌های اخیر استفاده از نوارهای FRP برای تقویت سازه‌های فلزی موجود نیز مورد توجه قرار گرفته است. از جمله نخستین تحقیقات در این زمینه می‌توان به تحقیق آکورد و ارلز [۳] در سال ۲۰۰۶ اشاره کرد که نشان دادند بکارگیری کامپوزیت GFRP^۲ در تقویت اجزاء سطح مقطع تیر I شکل، علاوه مهابندی این اعضاء در برابر وقوع کمانش موضعی، افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی عضو را نیز به دنبال خواهد داشت. هریس و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۹ نیز به بررسی استفاده از نوار FRP در تقویت عضو فشاری به منظور بهبود رفتار کمانش کلی و موضعی پرداختند. در این روش از سختی بالا و رفتار خطی مصالح FRP برای مهابندی بال یا جان در برابر کمانش موضعی استفاده گردید. نتایج نشان داد که تقویت با نوار FRP قادر به تاثیر بر رفتار موضعی و افزایش ظرفیت حمل بار متناسب با افزایش شعاع ژیراسیون حول محور ضعیف است.

در تحقیقی دیگر، شات و فام [۵] در سال ۲۰۰۹ نتایج تحقیق آزمایشگاهی بارگذاری محوری ستون‌های توخالی مربعی با نسبت لاغری مختلف که با ورق CFRP^۳ تقویت شده بودند را ارائه نمودند. نتایج نشان داد در نمونه‌های با نسبت لاغری بالاتر، ورق CFRP تاثیر بیشتری بر بهبود رفتار ستون دارد و منجر به افزایش بار نهایی و سختی محوری خواهد شد. لینگاف و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۰ نیز با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی به انجام تحقیقات بر روی رفتار تیرهای تقویت شده با ورق‌های CFRP، پرداختند. نتایج نشان داد که با تقویت بال کششی تیر I شکل با مقطع دابل، می‌توان مقاومت خمشی را به میزان ۲۰٪ افزایش داد. در تحقیق دیگر، نارماشیری و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۲ اقدام به انجام آزمایشاتی به منظور ارزیابی سختی موضعی تیر I شکل تقویت شده با ورق CFRP نمودند. نتایج نشان داد که با تقویت بال فشاری و جان، ظرفیت باربری تیر افزایش یافته و تغییر شکل جانبی و کلی کاهش می‌یابد.

از دیگر تحقیقات می‌توان به پژوهش التاولی و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۱ اشاره نمود که به بررسی اثرات CFRP بر رفتار غیر الاستیک اعضای خمشی پرداختند. دو نمونه تقویت شده در نواحی مفصل پلاستیک، تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. نتایج حاکی از کاهش مقادیر کرنش در مفاصل پلاستیک بود. همچنین پیشنهاد شد که تقویت با ورق CFRP می‌تواند برای بهبود رفتار سازه‌های فولادی در نواحی لرزه‌ای با خطر بالا بکار رود. تنگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۲ نیز به منظور تقویت خمشی تیر فولادی اثرات چسباندن کامپوزیت FRP به بال

^۱Fiber-Reinforced Polymer

^۲Glass Fiber-Reinforced Polymer

^۳Carbon Fiber-Reinforced Polymer

کشی مقطعی I شکل را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد استفاده از این روش منجر به افزایش بار نهایی تیر خواهد شد، به ویژه زمانی که از ورق CFRP با مدول الاستیسیته بالا استفاده شود. کمانش موضعی بال فشاری، کمانش جان، گسیختگی ورق FRP، جدا شدن قسمت انتهایی و یا قسمت میانی ورق FRP نیز به عنوان حالات گسیختگی تیر تقویت شده مطرح گردید.

پارک و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۳، نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی بارگذاری محوری ستون توخالی تقویت شده با ورق CFRP را ارائه نمودند. نتایج حاکی از به تاخیر انداختن کمانش موضعی در دو لبه موازی نمونه تقویت شده و افزایش ظرفیت حمل بار محوری بود. الصدیقی و الداماتی [۱۱] نیز در سال ۲۰۱۳، به کمک مدل اجزاء محدود به ارزیابی رفتار کمانش تیرهای بال پهن تقویت شده با چسباندن GFRP به بال فشاری پرداختند. نتایج حاکی از افزایش ظرفیت حمل بار نمونه‌های تقویت شده در زمان گسیختگی بود. تنگ و همکاران [۱۲] نیز در سال ۲۰۱۵، به کمک مدل اجزاء محدود با بررسی رفتار اتصال ورق CFRP در تقویت تیر I شکل امکان پیش‌بینی دقیق حالات گسیختگی اتصال را فراهم نمودند. نتایج نشان دادند زمانی که از یک ورق برای تقویت تیر استفاده می‌شود، جدا شدن انتهای ورق CFRP محتمل‌ترین حالت گسیختگی است. همچنین حالت گسیختگی با افزایش طول ورق تقویت کننده ممکن است به جدا شدن قسمت میانی یا دیگر حالات گسیختگی نظیر کمانش بال فشاری تغییر کند.

در این پژوهش به کمک روش اجزاء محدود و تحلیل استاتیکی با استفاده از نرم افزار ABAQUS برای ورق‌ها و مقاطع فولادی مورد مطالعه، به ارزیابی رفتار آن قبل و پس از تقویت با ورق GFRP پرداخته شده است. در ارزیابی رفتار استاتیکی صفحات فولادی، تاثیر پارامترهایی نظیر نسبت پهنای به ضخامت و میزان ناکاملی هندسی اولیه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تاثیر میزان نقص هندسی اولیه بر کاهش ظرفیت هر دو نمونه‌های تقویت شده و تقویت نشده نیز ارزیابی گردیده است. در ادامه با مدل‌سازی دو تیر ورق، تحلیل استاتیکی به منظور ارزیابی تاثیر چیدمان ورق GFRP بر روی بال فشاری و جان، بر افزایش ظرفیت خمشی نمونه‌ها انجام شده است. برای ستون‌های فولادی قوطی I شکل و I شکل مورد مطالعه نیز به بررسی و مقایسه رفتار محوری و جانبی نمونه‌ها قبل و بعد از تقویت با چیدمان مختلف ورق GFRP پرداخته شده است.

۲- مشخصات مصالح

سه ماده اصلی مورد استفاده در این تحقیق، فولاد، ورق GFRP و چسب هستند که مشخصات آن‌ها بر اساس مقادیر موجود در تحقیق الصدیقی و الداماتی [۱۳] آورده شده است. جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات فولاد و کامپوزیت GFRP را نشان می‌دهد. مشخصات چسب مورد استفاده برای چسباندن ورق GFRP به عضو فولادی نیز در جدول ۳ بر اساس مقادیر ارائه شده مطابق نتایج تحقیقات الداماتی و ابوشاگر [۱۴] ارائه شده است. ایشان در سال ۲۰۰۳، اقدام به انجام مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی به منظور ارزیابی رفتار برشی و نرمال اتصالات چسبیده شده فولاد و کامپوزیت FRP نمودند. تحقیقات اولیه توسط ایشان به منظور تعیین نوع چسبی که بالاترین مقاومت را برای اتصال فراهم کند، صورت گرفت و منجر به انتخاب چسب متاکریلات گردید. الصدیقی و الداماتی در تحقیقات خود از این نوع چسب به منظور ارزیابی رفتار صفحات فولادی تقویت شده با ورق GFRP [۱۱] و نیز رفتار تیرهای فولادی بال پهن تقویت شده با چسباندن GFRP به بال فشاری [۱۳] استفاده نمودند.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی فولاد [۱۳]

نوع فولاد	مدول الاستیسیته (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ضریب پواسون
M350	2×10^5	۳۵۰	۴۸۰	۰/۳

جدول ۲: مشخصات کامپوزیت GFRP [۱۳]

نوع کامپوزیت	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)	ضریب پواسون
EXTREN 525	$1/38 \times 10^5$	۲۰۶/۸	۰/۳۱

جدول ۳: مشخصات چسب [۱۳]

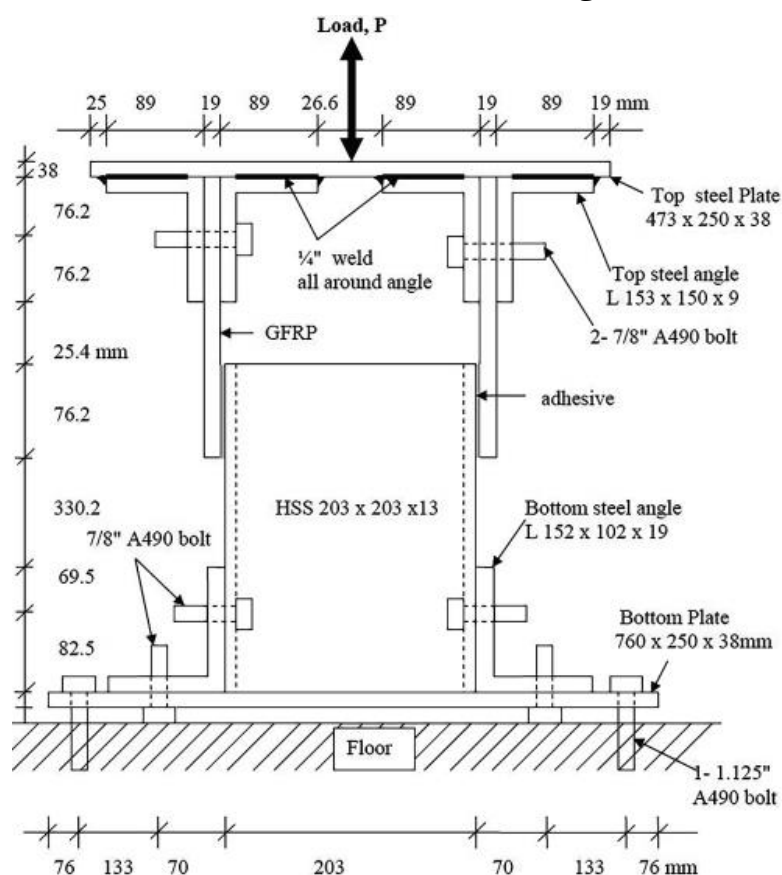
نوع چسب	ضخامت (mm)	سختی برشی (N/mm^3)	سختی نرمال (N/mm^3)	مقاومت برشی (MPa)	مقاومت نرمال (N/mm)
Methacrylate	۰/۷۹	۲۱/۷۹	۲/۲۶	۱۵/۵	۴/۰

۳- صحت سنجی روش مدل سازی در نرم افزار

در تحقیق حاضر مدل سازی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS [۱۵] انجام شده است. نتایج بدست آمده به منظور اطمینان از صحت عملکرد نرم افزار با نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و اجزاء محدود مقایسه گردیده است. به منظور بررسی صحت مدل سازی اتصال عضو فولادی و کامپوزیت GFRP از آزمایش انجام شده توسط الصدیقی و الداماتی [۱۳] در سال ۲۰۱۲، کمک گرفته شده است. این آزمایش به منظور کنترل صحت نتایج مدل اجزاء محدود برای ارزیابی رفتار کمانش صفحات فولادی تقویت شده با ورق GFRP با در نظر گرفتن ناکاملی هندسی و نیز ارزیابی رفتار تیرهای بال پهن تقویت شده با چسباندن ورق های GFRP به بال فشاری انجام شده بود.

آزمایش انجام گرفته شامل نمونه های چسبیده شده مقاطع ستون فولادی توخالی و ورق های GFRP بودند. ستون دارای ابعاد $203 \times 203 \times 13 \text{ mm}^3$ و به طول 550 mm و ورق GFRP نیز به ابعاد $254 \times 51 \text{ mm}^2$ و با ضخامت 19 mm در آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند. از چسب متاکریلات برای اتصال آنها استفاده شد. مساحت ناحیه چسبیده شده نیز $76 \times 51 \text{ mm}^2$ در نظر گرفته شد. مشخصات مصالح فولاد، ورق GFRP و چسب به ترتیب مطابق با مقادیر ارائه شده در جداول ۱، ۲ و ۳ می باشد. نمونه ها تحت بارگذاری مونوتونیک به صورت تغییر مکان کنترل شده به میزان $0/5 \text{ mm/min}$ قرار گرفتند. شکل ۱ نمایشی شماتیک از این آزمایش را به همراه محل اعمال بار

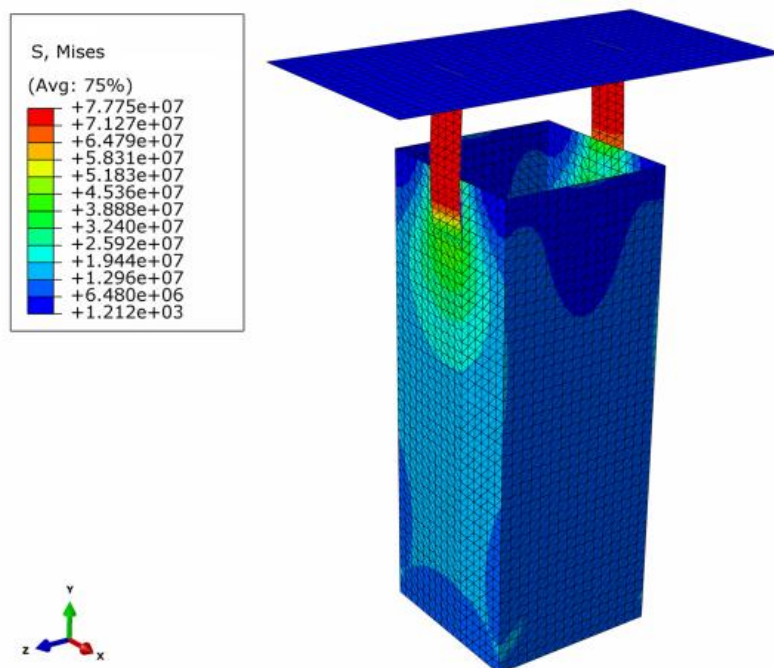
نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ورق فولادی پایینی متصل به ستون، با پیچ محکم به زمین وصل شده است. در حالی که ورق فولادی بالایی متصل به GFRP، در تماس با قسمت اعمال بار می‌باشد.



شکل ۱: نمایش شماتیک آزمایش اتصال فولاد و کامپوزیت GFRP در مطالعات الصدیقی و الداماتی [۱۳]

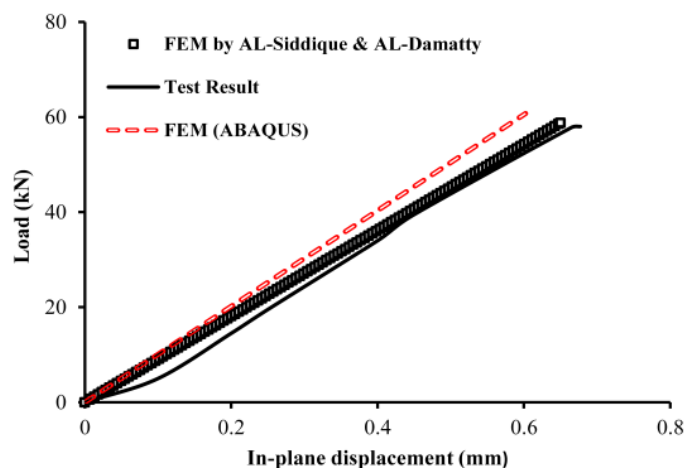
به منظور بررسی صحت عملکرد نرم افزار، نمونه‌های مشابه آزمایش ذکر شده در نرم افزار مدل‌سازی گردیده است. مدل‌سازی ستون و کامپوزیت GFRP به صورت Shell با المان سه گرهی S3 انجام گرفته شده است. برای مدل‌سازی چسب بین این دو مطابق جدول ۳، المان‌هایی با مقطع مربعی و با طولی برابر ضخامت چسب استفاده شده است. نوع المان مورد استفاده برای چسب، المان سه گرهی B32 در نظر گرفته شد. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون چسب به گونه‌ای انتخاب شده است که سختی برشی و نرمال چشمه اتصال چسب مطابق مقادیر داده شده در جدول ۳ فراهم شود. دو سر المان چسب به کمک دستور Tie در نرم افزار به عضو فولادی و ورق GFRP متصل گردید. از این دستور در نرم افزار برای متصل دو قطعه به صورت کامل و پیوسته در نواحی اتصال استفاده می‌شود.

پس از مدل‌سازی و سرهم بندی اعضاء، شرایط مرزی مشابه نمونه آزمایشگاهی به مدل نرم افزاری معرفی می‌گردد. به همین منظور، مقادیر تغییر مکان و چرخش حول هر سه محور مختصات برای انتهای ستون فولادی مقید شده است. بدین ترتیب شرایط گیردار برای انتهای ستون در نرم افزار اعمال خواهد شد. هیچ گونه شرایط مرزی دیگری برای سایر اعضای مدل اعم از ورق GFRP اعمال نشده است تا امکان حرکت برای ورق GFRP در راستای قائم وجود داشته باشد. در مرحله بارگذاری، بار به صورت تغییر مکان به جای اعمال به نقطه میانی صفحه فولادی فوقانی به کل صفحه وارد شده است. این کار برای جلوگیری از تشکیل تنش‌های بحرانی در یک نقطه و دستیابی به دقت بیشتر در استخراج نتایج صورت گرفته است. در طول مدت بارگذاری تغییر مکان درون صفحه در انتهای ورق GFRP ثبت گردید. شکل ۲ حالت توزیع تنش و مقادیر آن را برای مدل نرم‌افزاری پس از بارگذاری نشان می‌دهد.



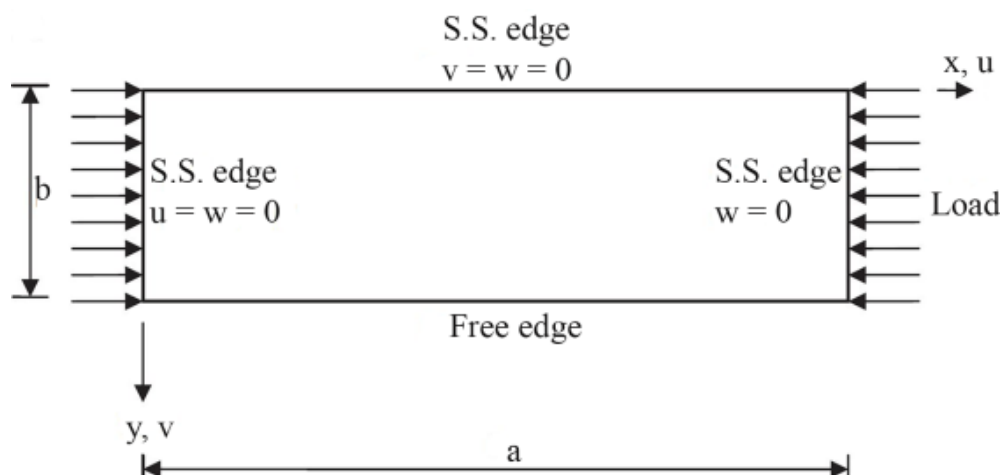
شکل ۲: حالت توزیع تنش در مدل نرم افزاری ستون و ورق GFRP

شکل ۳ نمودار بار- تغییر مکان قائم انتهای ورق GFRP را برای مدل شبیه سازی شده در نرم افزار ABAQUS، نمونه آزمایشگاهی و مدل المان محدود الصدیقی و الداماتی [۱۳] را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار ملاحظه می‌شود، نتایج بدست آمده از مدل عددی تطابق بسیار مناسبی با نتایج مدل المان محدود و نمونه آزمایشگاهی نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمودار بار- تغییر مکان قائم انتهای ورق GFRP

الصدیقی و الداماتی [۱۳] از مدل المان محدود به منظور ارزیابی رفتار کمانش صفحات فولادی تقویت شده با ورق GFRP با در نظر گرفتن ناکاملی هندسی اولیه استفاده نمودند. در این تحقیق یک نمونه ورق مستطیلی با تکیه‌گاه مفصلی در سه لبه و یک لبه آزاد مطابق شکل ۴ بررسی گردید. طول ورق ۱۵۲۰ mm، عرض آن ۷۶ mm و با ضخامت ۶/۶ mm در نظر گرفته شد. بنابراین نسبت طول به عرض آن برابر ۲۰ خواهد بود.



شکل ۴: شرایط مرزی به صورت تکیه‌گاه مفصلی در سه لبه و یک لبه آزاد برای ورق فولادی تحت فشار در تحقیق الصدیقی و الداماتی [۱۳]

به منظور ایجاد ناکاملی هندسی در ورق، تابع تغییر مکان فرضی مطابق رابطه ۱ به گونه‌ای انتخاب شد تا مطابق با اولین حالت کمانش ورق باشد [۱۳]:

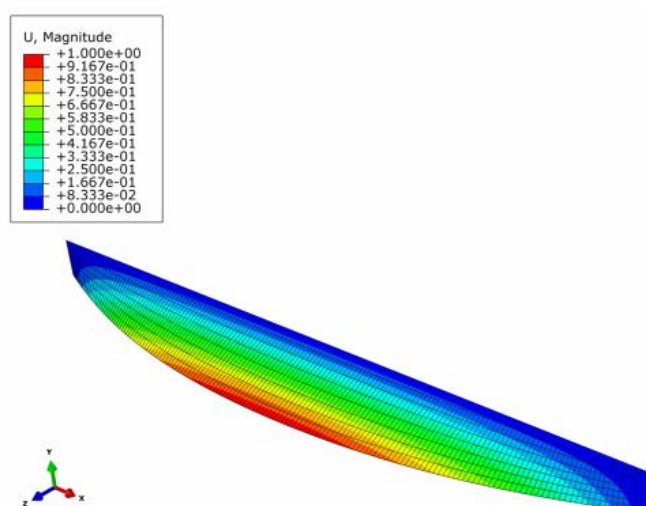
$$W_0(x, y) = A \frac{y}{b} \sin \frac{\pi x}{a} \quad (1)$$

در این رابطه A معرف دامنه اولیه تابع تغییر مکان، W_0 جابجایی عمود بر صفحه، a طول و b عرض ورق می‌باشد. رابطه (۱) مطابق با شرایط مرزی ورق با توجه به شکل ۴ می‌باشد و برای هر دو ورق فولاد و GFRP بکار گرفته شد. در تحقیق مرجع [۱۳] به منظور ارزیابی رفتار الاستیک ورق فولادی تقویت نشده و تقویت شده با ورق GFRP با در نظر گرفتن ناکاملی هندسی اولیه، مجموعه تحلیل‌هایی با بکارگیری مقادیر مختلف دامنه تابع تغییر مکان یعنی A ، انجام گرفت. در نمونه‌های مورد بررسی، مقدار A به شکل نسبتی از ضخامت ورق فولادی (t) با مقادیر مختلف $0.1t, 0.12t, 0.15t, 0.25t, 0.5t, 1.0t$ و $2.0t$ به عنوان ناکاملی هندسی اولیه به مدل اضافه گردید. همچنین برای تقویت ورق فولادی از یک ورق GFRP به ضخامت $12/5\text{mm}$ به نحوی که کل سطح ورق فولادی را بپوشاند استفاده شد.

به منظور بررسی صحت مدل‌سازی و نتایج تحلیل ورق فولادی تقویت شده با ورق‌های GFRP با در نظر گرفتن ناکاملی هندسی در نرم افزار المان محدود ABAQUS، ورق فولادی با ابعاد و شرایط مرزی مشابه با نمونه ارائه شده در تحقیق مرجع [۱۳] (شکل ۴) مدل‌سازی گردید. از ورق GFRP با ضخامت $12/5\text{mm}$ برای تقویت ورق فولادی استفاده شد.

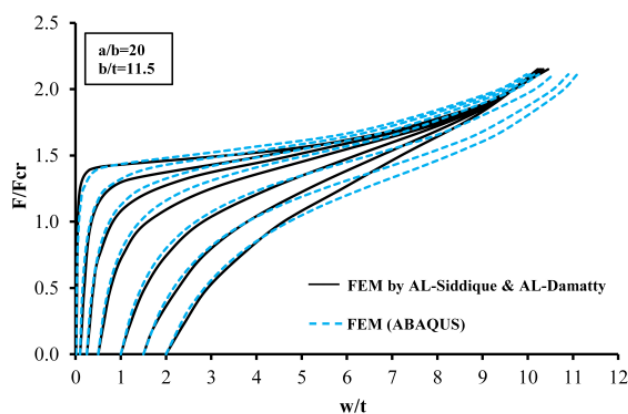
معمولاً ناکاملی هندسی در ورق به صورت ضربی از مود کمانشی معرفی می‌شود. به همین منظور در نرم افزار لازم است دو تحلیل جداگانه انجام گیرد؛ تحلیل اول بر روی سیستم ایده‌آل و فاقد هر گونه ناکاملی انجام شده تا مودهای کمانشی سیستم حاصل شود. پس از آن در تحلیل دوم برای اعمال ناکاملی از مود شکل مورد نظر در تحلیل اول استفاده می‌شود. به این صورت که ضربی از مود کمانشی مذکور به عنوان ناکاملی هندسی به سیستم اعمال شده و تحلیل مورد نظر انجام می‌گیرد.

بنابراین در این قسمت نیز پس از اتمام مدل‌سازی و در تحلیل اول ابتدا به کمک یک آنالیز خطی کمانش در نرم افزار، ورق فولادی تقویت نشده و تقویت شده با کامپوزیت GFRP تحلیل شدند تا مقدار بار بحرانی کمانش و مود شکل کمانش آن‌ها حاصل شود. از مود شکل اول کمانش برای اعمال ناکاملی هندسی در هر دو سیستم استفاده گردید. شکل ۵ مود شکل اول کمانش ورق برای شرایط مرزی مطابق با شکل ۴ را نشان می‌دهد که از آن برای اعمال ناکاملی هندسی استفاده شده است.

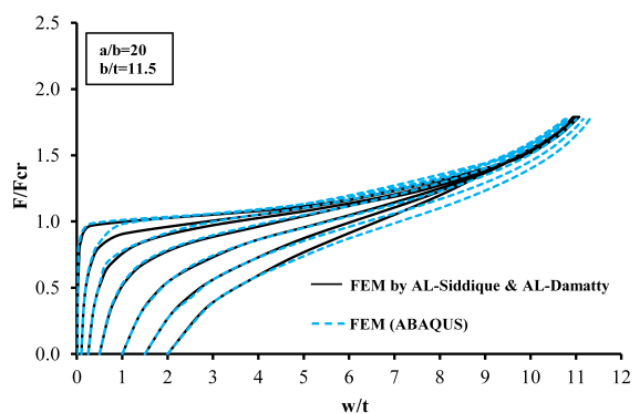


شکل ۵: مود شکل اول کمانش ورق برای اعمال ناکاملی هندسی

در ادامه و در تحلیل دوم ناکاملی هندسی با اعمال ضرایبی از ضخامت ورق فولادی به مود شکل اول کمانش مطابق تحقیق مرجع ایجاد گردید. با انجام تحلیل استاتیکی نتایج به صورت رفتار الاستیک ورق فولادی تقویت نشده و تقویت شده به ازای مقادیر مختلف ناکاملی هندسی اولیه در شکل ۶ آورده شده است. در این شکل، محور افقی بیانگر مقدار نرمالایز شده تغییر مکان نقطه میانی ورق (W) با مختصات $x=a/2$ و $y=b$ با توجه به شکل ۴ نسبت به ضخامت ورق فولادی (t) می‌باشد. محور قائم نیز بیانگر مقدار نرمالایز شده بار محوری بکار رفته (F) نسبت به ظرفیت کمانش الاستیک سیستم کامل بدون ناکاملی هندسی (F_{cr}) است. همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل شده از نرم افزار تطابق بسیار خوبی با نتایج تحقیق مرجع دارند.



(ب)



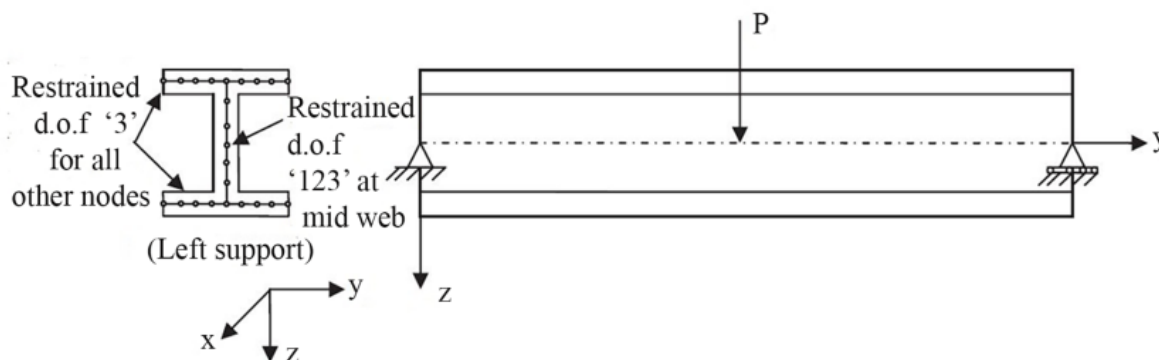
(الف)

شکل ۶: منحنی بار- تغییر مکان با در نظر گرفتن مقادیر مختلف ناکاملی هندسی: الف- ورق فولادی تقویت نشده ب- ورق تقویت شده با GFRP به ضخامت $12/5\text{mm}$ الصدیقی و الداماتی [۱۱] در تحقیقی دیگر با بکارگیری مدل المان محدود خود به منظور ارزیابی رفتار تیرهای بال پهن تقویت شده با ورق‌های GFRP در بال فشاری پرداختند. مشخصات تیر ۱ شکل مورد مطالعه در جدول ۴ آورده شده است. از ورق GFRP و با چهار ضخامت $9/5\text{mm}$ ، $12/5\text{mm}$ ، $15/5\text{mm}$ و 19mm برای تقویت بال فشاری تیر فولادی استفاده گردید. دو نوع شرایط مرزی دو سر مفصل و یک سر گیردار برای تیر در نظر گرفته شد. نحوه بارگذاری نمونه‌های یک سر گیردار به صورت اعمال بار متمرکز به نقطه میانی جان در انتهای آزاد تیر و برای نمونه‌های دو سر مفصل به صورت اعمال بار متمرکز به نقطه میانی جان در وسط دهانه بود.

جدول ۴: مشخصات هندسی تیر I شکل مورد بررسی در تحقیق الصدیقی و الداماتی [۱۱]

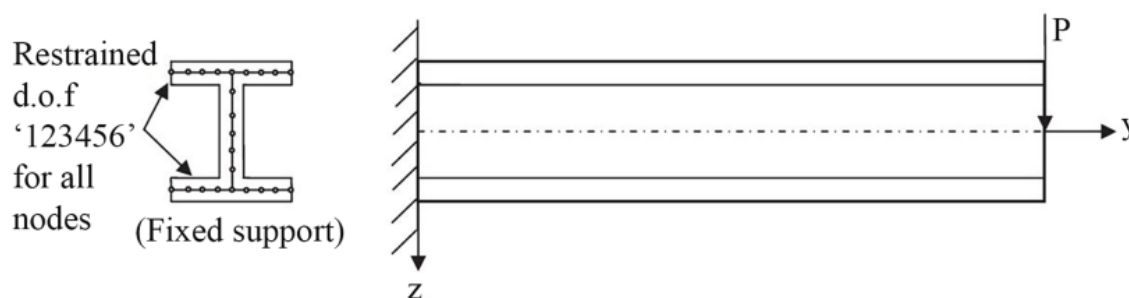
طول تیر L (mm)	لاغری جان h/w	ضخامت جان w (mm)	ارتفاع جان h (mm)	لاغری بال b _f /2t _f	ضخامت بال t _f (mm)	پهنای بال b _f (mm)
۲۰۰۰	۴۶/۷	۷/۵	۳۵۰	۳۰	۵	۳۰۰

به منظور صحت سنجی روش مدل‌سازی تیر I شکل تقویت شده، نمونه‌ای مشابه با شرایط ذکر شده در نرم افزار مدل‌سازی گردید. مدل‌سازی تیر فولادی و ورق GFRP به صورت Shell و با استفاده از المان چهار گرهی S4R انجام گرفته شده است. به منظور ایجاد شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل برای تیر I شکل، مقادیر تغییر مکان در راستای ارتفاع جان برای تمامی نقاط لبه تیر در هر دو انتها مقید گردید. همچنین مقادیر تغییر مکان در دو راستای دیگر محور مختصات برای نقطه میانی جان در دو انتها محدود گردیده است. در شکل ۷ نحوه اعمال شرایط مرزی و محل اعمال بار متمرکز برای تیر دو سر مفصل نشان داده شده است. در این شکل اعداد ۱، ۲ و ۳ معرف مقادیر تغییر مکان به ترتیب در راستای محوره‌های مختصات x، y و z می‌باشند.



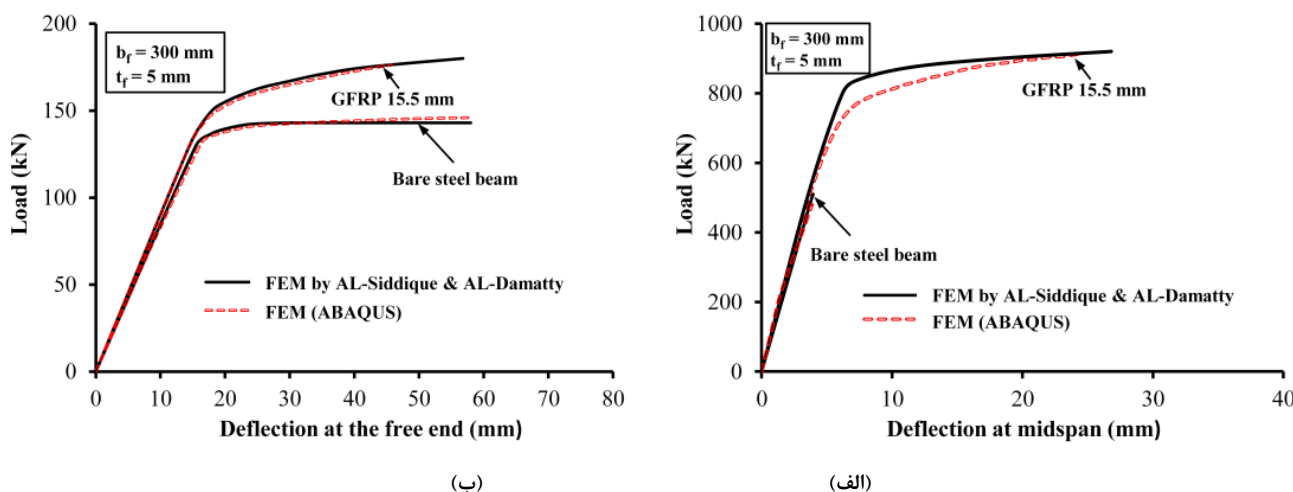
شکل ۷: نحوه اعمال شرایط مرزی و بارگذاری تیر دو سر مفصل [۱۱]

به منظور ایجاد شرایط تکیه‌گاهی یک سر گیردار نیز مقادیر تغییر مکان و چرخش در سه راستای محور مختصات برای تمامی نقاط لبه انتهایی تیر مطابق شکل ۸ مقید گردید. در این شکل اعداد ۴، ۵ و ۶ معرف مقادیر چرخش به ترتیب حول راستای محوره‌های x، y و z می‌باشند.



شکل ۸: شرایط مرزی و بارگذاری تیر یک سر گیردار [۱۱]

پس از اتمام مدل‌سازی، تحلیل استاتیکی برای نمونه‌ها انجام گردید. شکل ۹ نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه تیر دو سر مفصل و نمودار بار- تغییر مکان انتهایی آزاد تیر یک سر گیردار را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده در کنار نتایج تحقیق مرجع برای تیر تقویت شده در بال فشاری با ورق GFRP به ضخامت ۱۵/۵ mm آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج از انطباق بسیار خوبی با یکدیگر برخوردارند.



شکل ۹: نتایج تحلیل تیر I شکل تقویت شده در بال فشاری با ورق GFRP به ضخامت ۱۵/۵ mm (الف) نمودار بار- تغییر مکان نقطه وسط دهانه تیر دو سر مفصل (ب) نمودار بار- تغییر مکان انتهایی آزاد تیر یک سر گیردار

۴- معرفی مدل‌های مورد بررسی

در تحقیق حاضر رفتار استاتیکی صفحات، تیرهای I شکل و ستون فولادی تقویت شده با ورق‌های GFRP ارزیابی گردیده است. برای صفحات فولادی، نمونه مورد مطالعه یک ورق مستطیلی با تکیه‌گاه مفصلی در سه لبه و یک لبه آزاد بوده که با ورق GFRP با ضخامت‌های مختلف ۹/۵mm، ۱۲/۵mm و ۱۵/۵mm تقویت شده است. طول نمونه ۱۵۲۰mm، عرض آن ۷۶mm با ضخامت ۶/۶mm در نظر گرفته شده و تحت تاثیر نیروهای محوری فشاری در طول لبه‌های خود در جهت X با توجه به شکل ۴ قرار گرفته است. ابعاد ورق GFRP نیز برابر با ابعاد ورق فولادی لحاظ شده است. در ادامه با کاهش ضخامت ورق به ۳mm، تاثیر افزایش نسبت پهنا به ضخامت نمونه نیز ارزیابی گردیده است.

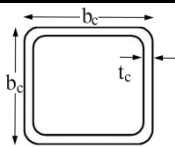
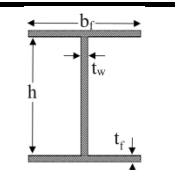
برای تیرهای I شکل، مدل‌های مورد مطالعه شامل دو تیر ورق با مشخصات هندسی مطابق با جدول ۵ می‌باشد. دو نوع شرایط مرزی دو سر مفصل و یک سر گیردار به ترتیب مطابق شکل‌های ۷ و ۸ در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از کمانش جانبی، مقادیر تغییر مکان در راستای عمود بر جان برای نقاط مرکزی هر دو بال در طول تیر مقید شده است. در حالت کلی دو نوع چیدمان ورق GFRP شامل چیدمان ورق بر روی بال فشاری و جان بررسی شده است. ضخامت ورق GFRP متغیر و برابر با ۱۲/۵mm، ۱۵/۵mm و ۱۹mm لحاظ شده است. عرض ورق GFRP که برای تقویت بال تیر مورد استفاده قرار گرفته است معادل عرض بال هر نمونه و عرض ورق GFRP مورد استفاده برای تقویت جان نمونه‌های Beam1 و Beam2 به ترتیب ۱۸ cm و ۲۴ cm انتخاب گردید. طول ورق نیز برای تمامی مدل‌ها به اندازه طول دهانه تیر در نظر گرفته شده است.

جدول ۵: مشخصات هندسی تیرهای I شکل مورد مطالعه

نمونه	طول دهانه (cm)	ابعاد جان (cm)		لاغری جان h/t_w	ابعاد بال (cm)		لاغری بال $b_f/2t_f$
		h	t_w		b_f	t_f	
Beam1	۲۴۰	۲۴	۰/۸	۳۰	۱۵	۱	۷/۵
Beam2	۲۴۰	۳۲	۰/۶۸	۴۷/۰۶	۱۸	۰/۸۶	۱۰/۴۶

برای ستون‌های فولادی نمونه‌های مورد بررسی شامل چهار نمونه متشکل از یک ستون کوتاه و سه نمونه ستون بلند با مشخصات هندسی مطابق با جدول ۶ می‌باشد. ستون کوتاه مورد بررسی مشابه ستون مورد استفاده در آزمایش پارک و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۳ انتخاب شده است. ستون در دو انتها دارای تکیه‌گاه مفصلی بوده و تحت نیروی محوری فشاری که بر سطح مقطع آن اعمال شده قرار گرفته است. برای ستون‌های با مقطع قوطی شکل، چهار حالت چیدمان ورق GFRP بر روی یک لبه مقطع (1S)، دو لبه مجاور (2S-A)، دو لبه روبرو (2S-O) و تمامی لبه‌ها (4S) در نظر گرفته شده است. برای ستون‌های با مقطع I شکل نیز سه حالت چیدمان بر روی یک بال (A)، هر دو بال (B) و یک طرف جان (C) لحاظ گردیده است.

جدول ۶: مشخصات هندسی ستون‌های مورد بررسی

مقطع	نمونه	ارتفاع (cm)	ابعاد (cm)			
			b_c	t_c	h	t_f
	S-COL	۴۲/۷۸	۱۴/۲۶	۰/۲۳		
	L-COL	۲۴۰	۹	۰/۳		
	IPB 240	۲۴۰	۲۰/۶	۱	۲۴	
	I-COL	۲۴۰	۲۴	۰/۶	۱۸	

۵- مطالعه پارامتری نمونه‌ها

در این بخش نتایج مربوط به تحلیل استاتیکی صفحات و مقاطع فولادی تقویت شده به وسیله ورق‌های GFRP ارائه گردیده است.

۵-۱- ارزیابی رفتار صفحات فولادی تقویت شده با ورق GFRP با در نظر گرفتن ناکاملی هندسی

در حالی که عمده اعضای تشکیل دهنده اجزای سازه‌های فولادی را ورق‌های نازک تشکیل می‌دهند، ممکن است در شرایط کارگاهی بر اثر حمل و نقل، ضربه و یا جوشکاری اعوجاج‌هایی در ورق بوجود آید. چنین اعوجاج‌هایی که از آن به عنوان ناکاملی هندسی اولیه یاد می‌شود می‌تواند پارامترهای مهمی نظیر سختی ارتجاعی و مقاومت نهایی را تحت تاثیر قرار دهد. در این بخش با توجه به اهمیت ناکاملی هندسی در سازه‌های جدار نازک و حساس بودن ورق فولادی به میزان نقص اولیه، نتایج مربوط به ارزیابی رفتار ورق فولادی تقویت شده با در نظر گرفتن ناکاملی هندسی ارائه گردیده است. پیش از انجام تحلیل استاتیکی، آنالیز کمانش به منظور ارزیابی ظرفیت کمانش مدل‌های تقویت نشده و تقویت شده بدون در نظر گرفتن ناکاملی هندسی انجام گردیده و نتایج در جدول ۷ آورده شده است. در این جدول ضریب

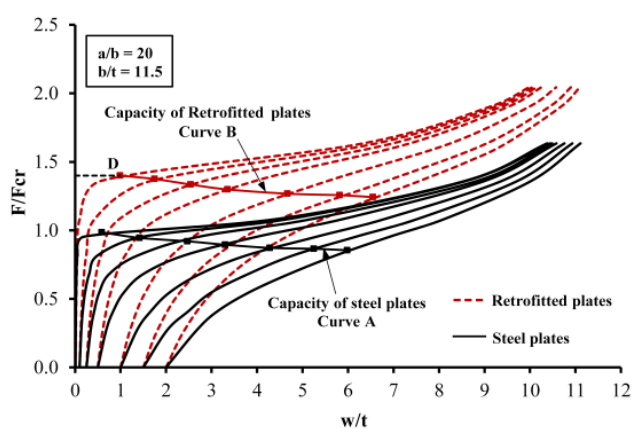
افزایش کمانش به عنوان نسبت ظرفیت تقویت شده به ظرفیت صفحات فولادی تقویت نشده تعریف و محاسبه گردیده است. از این نتایج در ارزیابی رفتار استاتیکی صفحات فولادی تقویت شده با در نظر گرفتن مقادیر مختلف ناکاملی هندسی استفاده شده است.

جدول ۷: نتایج تحلیل مربوط به نمونه‌های فاقد ناکاملی هندسی

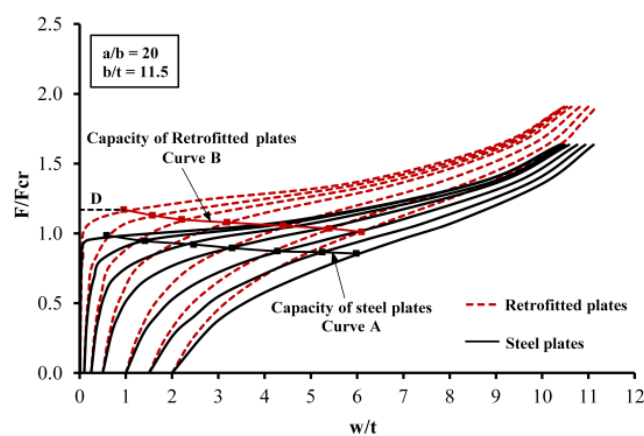
ابعاد ورق (mm)				ضخامت ورق	ظرفیت کمانش ورق (N)	ضریب افزایش ظرفیت کمانش ^۱
a	b	t	b/t	(mm) GFRP		
				-	۳۶۶۹۷۳۰	-
۱۵۲۰	۷۶	۶/۶	۱۱/۵	۹/۵	۴۴۰۸۱۲۰	۱/۲۰
				۱۲/۵	۵۲۷۶۱۵۰	۱/۴۳
				۱۵/۵	۶۵۴۱۶۳۰	۱/۷۸
۱۵۲۰	۷۶	۳	۲۵/۳	-	۳۵۷۴۵۷	-
				۹/۵	۱۰۹۷۳۶۰	۳/۰۷

۱- نسبت ظرفیت سیستم تقویت شده به ظرفیت صفحات فولادی تقویت نشده

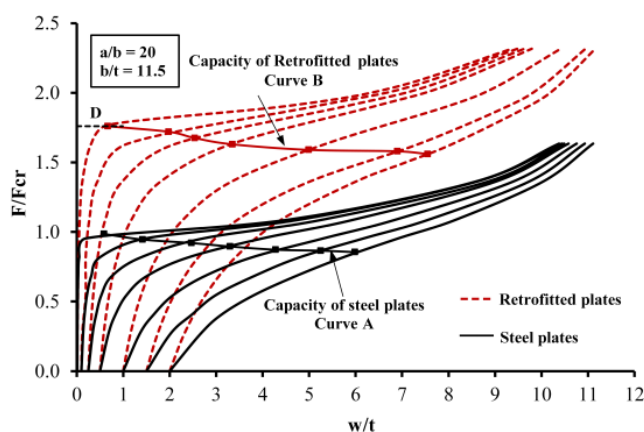
تحلیل ورق فولادی تقویت نشده و تقویت شده با در نظر گرفتن ناکاملی هندسی اولیه، با اعمال ضرایبی از ضخامت ورق فولادی به مود اول کمانش هر نمونه انجام گردیده است. ضرائب در نظر گرفته شده برابر ۰/۱، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ می‌باشند. نمونه‌هایی که از کمترین ضریب یعنی ۰/۱t برای اعمال ناکاملی برای آن‌ها استفاده شده و یا به عبارتی از نقص هندسی ناچیزی برخوردارند را می‌توان به عنوان صفحات کامل در ارزیابی نتایج تلقی کرد. شکل ۱۰ نتایج تحلیل را نشان می‌دهد که در آن محور افقی بیانگر مقدار نرمالایز شده تغییر مکان نقطه میانی ورق (w) در لبه آزاد نسبت به ضخامت ورق فولادی (t) است. محور قائم نیز بیانگر مقدار نرمالایز شده بار محوری بکار رفته (F) نسبت به مقادیر ظرفیت کمانش نمونه تقویت نشده فاقد ناکاملی هندسی (F_{cr}) که در جدول ۷ آورده شده است، می‌باشد. با توجه به نتایج استفاده از GFRP در تقویت ورق فولادی موجب افزایش سختی و ظرفیت حمل بار آن می‌گردد. اثر بخشی ورق GFRP نیز با افزایش ضخامت بیشتر می‌شود.



(ب)



(الف)



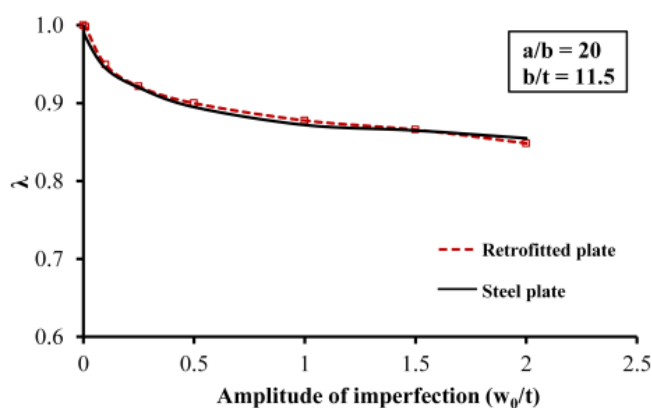
(ج)

شکل ۱۰: منحنی بار-تغییر مکان با در نظر گرفتن مقادیر مختلف ناکاملی هندسی برای ورق تقویت شده با کامپوزیت GFRP به ضخامت الف (ب) $9/\delta\text{mm}$ (ج) $12/\delta\text{mm}$ (د) $15/\delta\text{mm}$

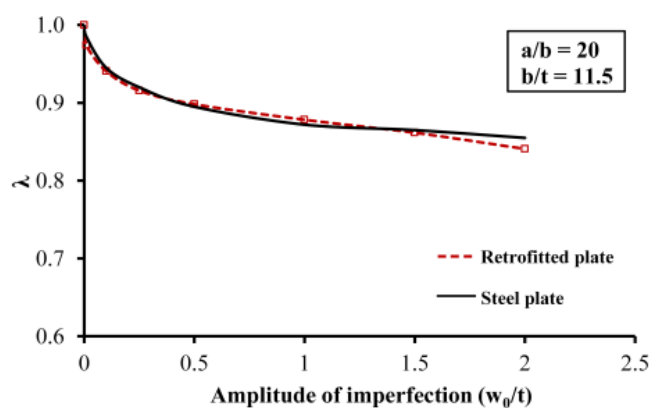
برای نتایج فوق، بار بحرانی ورق با نقص هندسی اولیه، برابر با باری تعریف می‌شود که ماکزیمم کرنش ایجاد شده در اثر آن برابر با ماکزیمم کرنش ایجاد شده در نمونه بدون نقص در شروع کمانش گردد [۱۳]. در شکل ۱۱ برای نمونه‌های تقویت نشده و تقویت شده، مقادیر بار بحرانی محاسبه شده برای ورق با مقادیر مختلف ناکاملی هندسی، به صورت نرمالایز شده به ترتیب در منحنی‌های A و B آورده شدند. برای نمونه‌های تقویت نشده و تقویت شده، می‌توان پارامتر λ را به صورت رابطه (۲) برای ارزیابی تاثیر مقادیر مختلف ناکاملی هندسی در کاهش ظرفیت ورق تعریف نمود [۱۳]:

$$\lambda = F_{im}/F_D \quad (2)$$

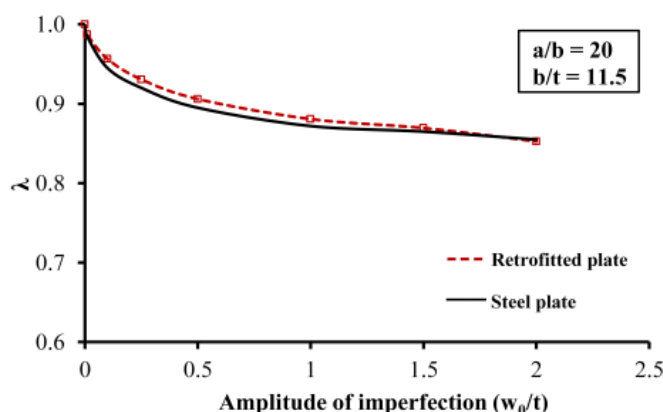
که در آن F_{im} مقادیر بار بحرانی ورق با نقص هندسی اولیه است و برای مدل‌های تقویت نشده و تقویت شده به ترتیب از محل تلاقی خطوط A و B با منحنی بار-تغییر مکان حاصل می‌شود. F_D نیز معرف ظرفیت نمونه فاقد ناکاملی هندسی می‌باشد. شکل ۱۱ محدوده تغییرات λ را در برابر مقادیر ناکاملی هندسی که نسبت به ضخامت نمونه نرمالایز شده‌اند را نشان می‌دهد.



(ب)



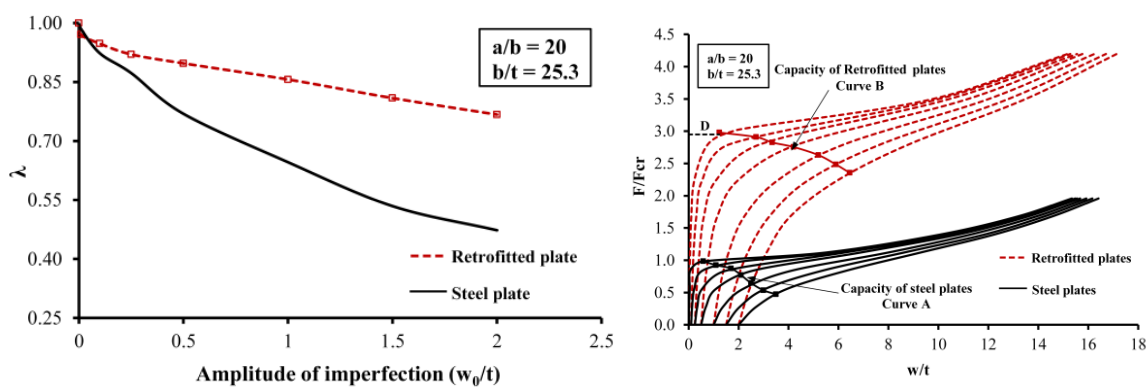
(الف)



(ج)

شکل ۱۱: تاثیر ناکاملی هندسی بر کاهش ظرفیت ورق تقویت شده با GFRP به ضخامت (الف) ۹/۵mm (ب) ۱۲/۵mm (ج) ۱۵/۵mm

از نتایج فوق می‌توان برای ارزیابی میزان کاهش بار بحرانی نمونه‌های تقویت نشده و تقویت شده در اثر حضور ناکاملی هندسی اولیه در ورق استفاده نمود. نتایج برای نمونه‌های تقویت نشده و تقویت شده نشان می‌دهد، پارامتر λ به عنوان نسبت ظرفیت سیستم با ناکاملی هندسی اولیه به ظرفیت سیستم بدون نقص، با افزایش مقدار ناکاملی هندسی اولیه کاهش می‌یابد. در ادامه با کاهش ضخامت ورق، تاثیر افزایش نسبت لاغری نمونه در شکل ۱۲ ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد ورق GFRP به مراتب تاثیر بیشتری در افزایش ظرفیت حمل بار صفحات فولادی با نسبت پهنا به ضخامت بالاتر دارد. صفحات فولادی تقویت نشده با نسبت لاغری بالاتر از حساسیت بیشتری نسبت به مقدار ناکاملی هندسی اولیه برخوردارند. برای این نوع صفحات می‌توان از طریق تقویت با ورق GFRP نه تنها ظرفیت حمل بار را بهبود بخشید بلکه می‌توان میزان حساسیت آن‌ها نسبت به مقادیر مختلف نقص هندسی اولیه را کاهش داد.



(ب)

(الف)

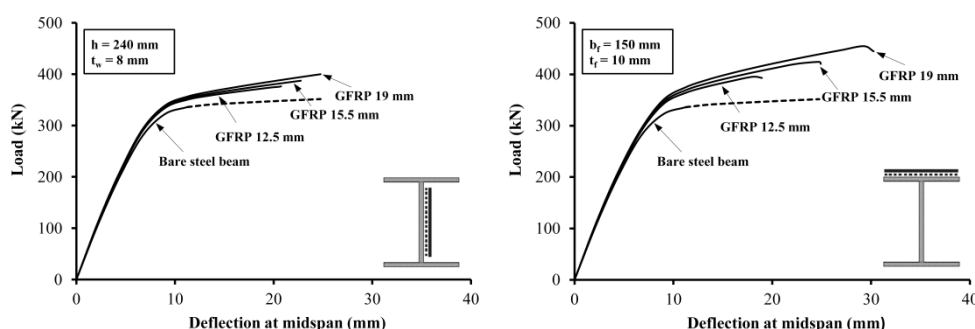
شکل ۱۲: نتایج ارزیابی ورق فولادی با نسبت لاغری بالاتر در حالت تقویت شده با GFRP به ضخامت ۹/۵mm

(الف) منحنی بار-تغییر مکان (ب) تاثیر ناکاملی هندسی بر کاهش ظرفیت ورق

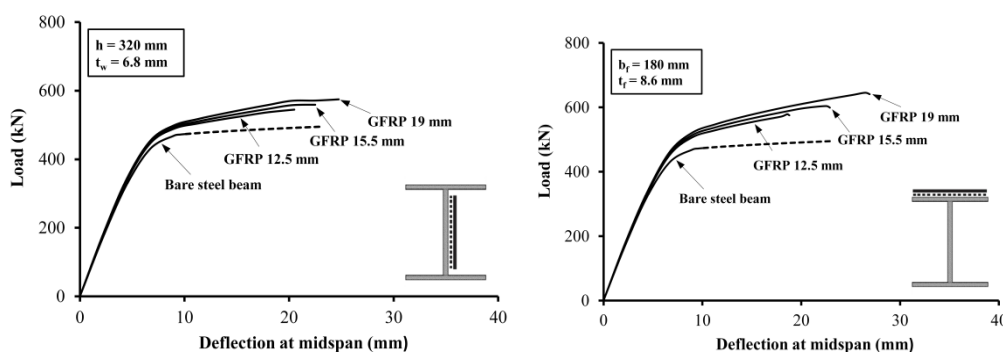
۲-۵- تقویت خمشی تیر ورق‌های فولادی با ورق‌های GFRP

در این بخش نتایج مربوط به ارزیابی رفتار تیرهای فولادی تقویت شده ارائه گردیده است. پارامترهای مورد بررسی شامل ارزیابی تاثیر نسبت پهنا به ضخامت اجزاء سطح مقطع تیر، شرایط تکیه‌گاهی اعمال شده، موقعیت قرارگیری ورق GFRP در سطح مقطع تیر و افزایش ضخامت

ورق تقویت کننده بر رفتار خمشی نمونه‌های تقویت شده می‌باشد. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نتایج تحلیل استاتیکی را به ترتیب برای نمونه‌های دو سر مفصل Beam1 و Beam2 نشان می‌دهد.

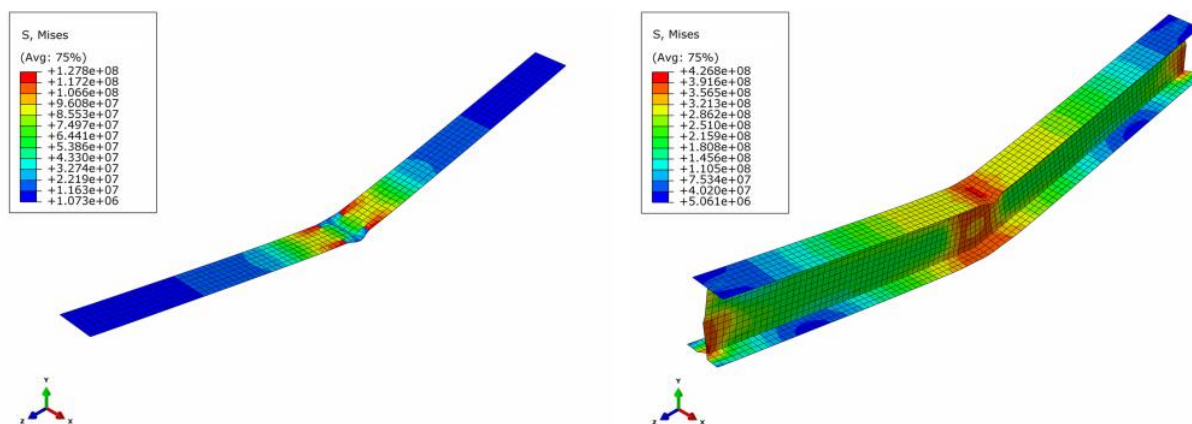


شکل ۱۳: نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه Beam1 دو سر مفصل در حالت چیدمان GFRP بر روی بال فشاری و جان



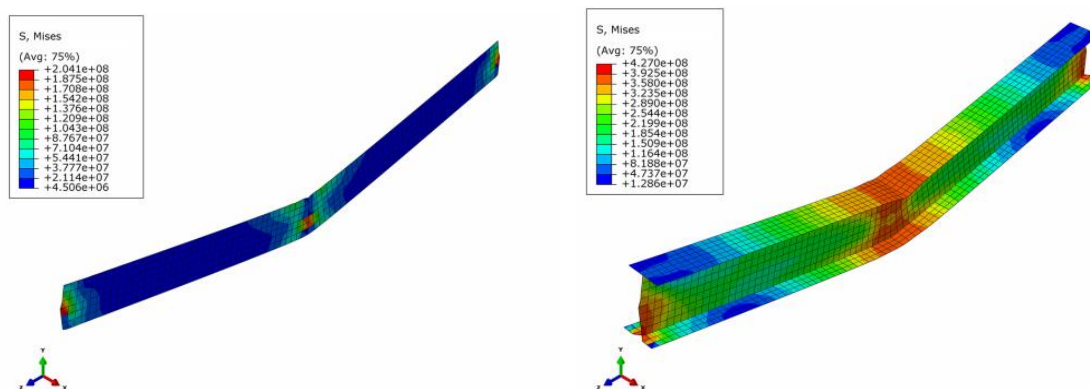
شکل ۱۴: نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه Beam2 دو سر مفصل در حالت چیدمان GFRP بر روی بال فشاری و جان

نتایج نشان می‌دهد استفاده از ورق GFRP در تقویت تیر موجب افزایش ظرفیت حمل بار آن شده است. با مقایسه نتایج برای دو حالت چیدمان، می‌توان گفت با قرار گیری ورق GFRP بر روی بال نتایج بهتری نسبت به حالت چیدمان ورق بر روی جان حاصل گردیده است. با تغییر ابعاد مقطع از نمونه Beam1 به مدل Beam2 و استفاده از بال و جان با نسبت پهنا به ضخامت بالاتر، به دلیل آن که کمانش موضعی رخ نداده تغییر محسوسی در نتایج حاصل نگردیده است. حالت شکست نمونه‌های تقویت شده در بال به صورت گسیختگی چسب و جدا شدن ورق GFRP در قسمت میانی طول تیر مشاهده گردید. شکل ۱۵ حالت توزیع تنش ایجاد شده در تیر فولادی و ورق GFRP را برای نمونه Beam1 نشان می‌دهد.



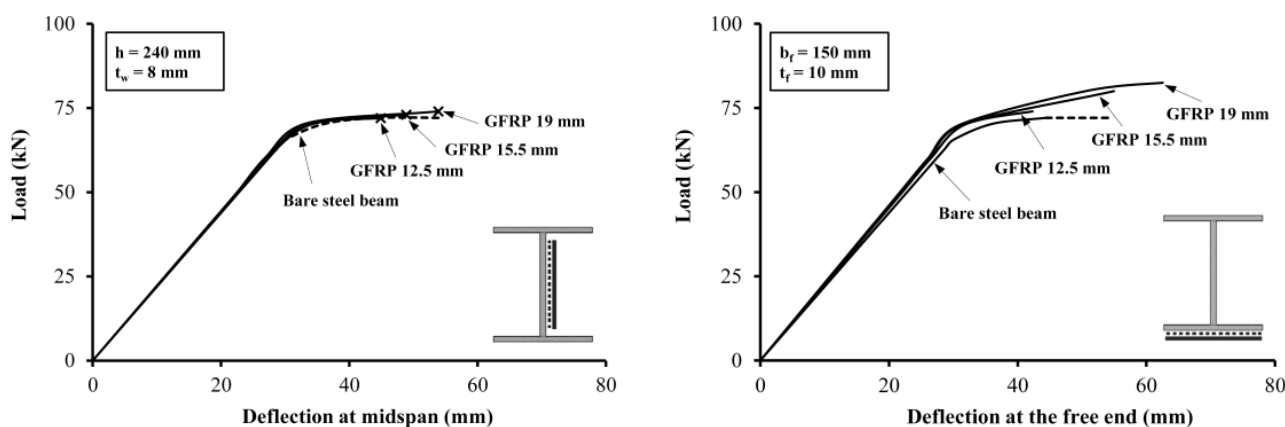
شکل ۱۵: حالت توزیع تنش در تیر فولادی و ورق GFRP برای نمونه Beam1 دو سر مفصل در حالت چیدمان GFRP بر روی بال فشاری

حالت شکست نمونه‌های تقویت شده با چیدمان ورق بر روی جان نیز به صورت گسیختگی چسب و جدا شدن ورق GFRP از جان در مرکز طول دهانه تیر مشاهده گردید. شکل ۱۶ حالت توزیع تنش ایجاد شده در تیر فولادی و ورق GFRP برای نمونه Beam1 در حالت چیدمان ورق بر روی جان را نشان می‌دهد.

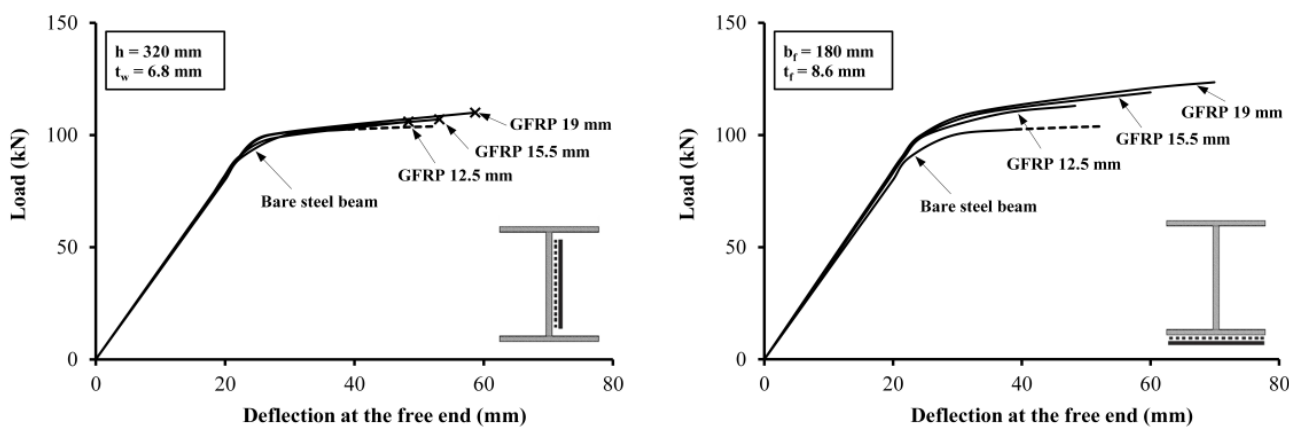


شکل ۱۶: حالت توزیع تنش در تیر فولادی و ورق GFRP برای نمونه Beam1 دو سر مفصل در حالت چیدمان ورق GFRP بر روی جان

با تغییر در شرایط تکیه‌گاهی تیر نتایج زیر برای تقویت شده یک سر گیردار ارائه شده است. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نمودارهای بار-تغییر مکان انتهای آزاد را به ترتیب برای نمونه‌های Beam1 و Beam2 با شرایط تکیه‌گاهی یک سر گیردار نشان می‌دهد.

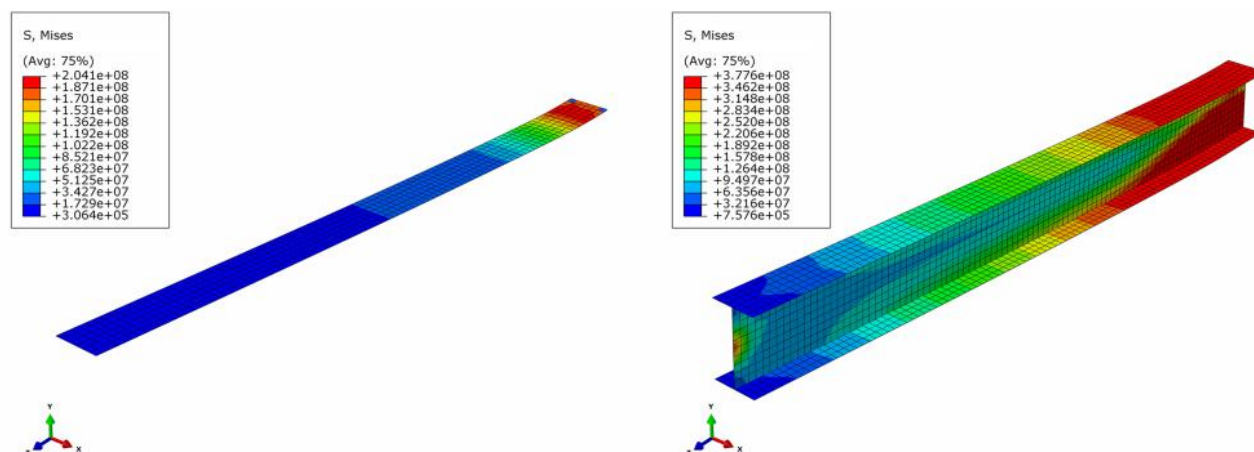


شکل ۱۷: نمودار بار-تغییر مکان انتهای آزاد Beam1 یک سر گیردار در حالت چیدمان ورق GFRP بر روی بال فشاری و جان



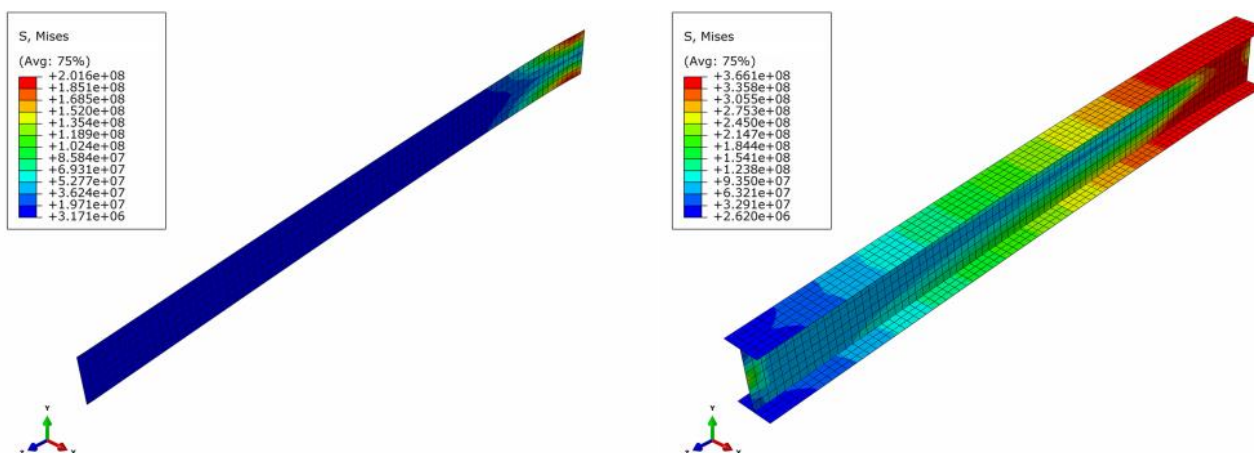
شکل ۱۸: نمودار بار-تغییر مکان انتهای آزاد Beam2 یک سر گیردار در حالت چیدمان ورق GFRP بر روی بال فشاری و جان

تاثیر ورق GFRP در افزایش ظرفیت حمل بار تیر یک سر گیردار کمتر از نمونه مشابه با تکیه‌گاه مفصلی در دو انتها ارزیابی شده است. برای تیر فولادی یک سر گیردار نیز استفاده از ورق GFRP در تقویت جان تاثیر چندانی بر افزایش مقاومت خمشی تیر نشان نداده است، چرا که جان مقطع در تعیین ظرفیت باربری مقطع تاثیر چندانی نداشته است. حالت شکست نمونه‌هایی از ورق GFRP برای تقویت بال تیر استفاده شده بود، به صورت گسیختگی ورق GFRP در نواحی نزدیک به تکیه‌گاه تیر مشاهده گردید. شکل ۱۹ حالت توزیع تنش ایجاد شده در تیر فولادی و ورق GFRP را برای نمونه Beam1 نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: حالت توزیع تنش در تیر فولادی و ورق GFRP برای نمونه Beam1 یک سر گیردار در حالت چیدمان ورق GFRP بر روی بال فشاری

حالت شکست نمونه‌های تقویت شده با چیدمان ورق GFRP بر روی جان نیز به صورت گسیختگی ورق GFRP در نواحی نزدیک به تکیه‌گاه تیر مشاهده گردید. شکل ۲۰ حالت توزیع تنش ایجاد شده در تیر فولادی و ورق GFRP برای نمونه Beam1 در حالت چیدمان ورق بر روی جان را نشان می‌دهد.



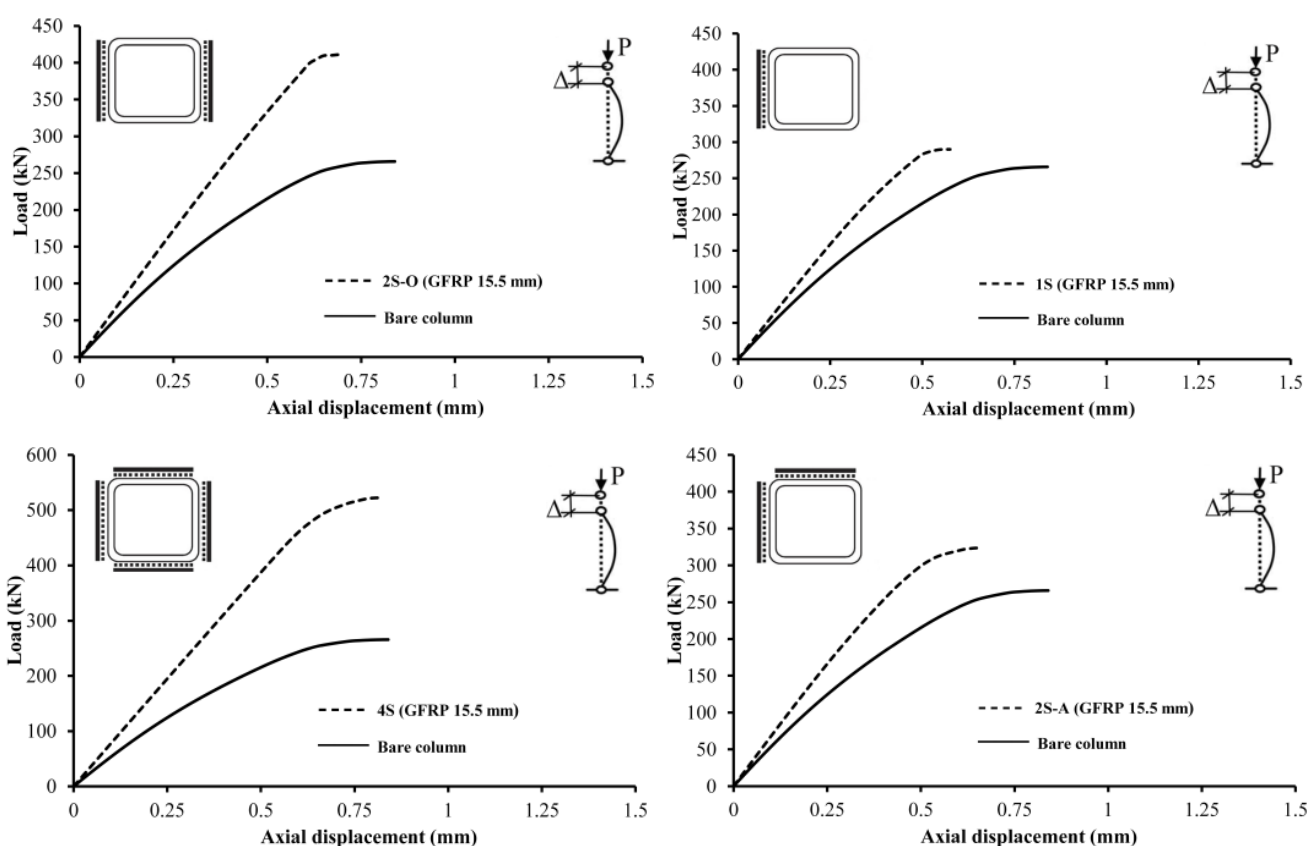
شکل ۲۰: حالت توزیع تنش در تیر فولادی و ورق GFRP برای نمونه Beam1 یک سر گیردار در حالت چیدمان ورق GFRP بر روی جان

۳-۵- ارزیابی رفتار ستون‌های فولادی تقویت شده با کامپوزیت GFRP

از جمله کاربردهای کامپوزیت‌های FRP استفاده از آن‌ها در تقویت ستون‌های فولادی در معرض بروز کمانش‌های موضعی و کلی می‌باشد. در این قسمت به ارزیابی تاثیر ورق GFRP بر رفتار کمانشی ستون‌های فولادی تقویت شده پرداخته شده است. تاثیر نوع مقطع ستون فولادی و بررسی نحوه چیدمان ورق GFRP با ضخامت‌های مختلف در مقطع ستون از موارد بررسی در ارزیابی رفتار کمانشی ستون‌های تقویت شده مورد مطالعه می‌باشد.

برای نمونه‌های مورد مطالعه تحلیل کمانش به منظور محاسبه بار بحرانی ستون به ازای مود اول و تحلیل استاتیکی به منظور بررسی و مقایسه رفتار محوری و جانبی نمونه‌ها قبل و بعد از تقویت با چیدمان مختلف ورق GFRP انجام شده است. ارزیابی رفتار محوری با ارائه نمودارهای بار اعمال شده در مقابل تغییر مکان محوری ایجاد شده برای تمامی نمونه‌ها و ارزیابی رفتار محوری با ارائه نمودارهای بار اعمال شده در برابر تغییر مکان محوری ایجاد شده در مرکز ارتفاع ستون برای ستون‌های بلند صورت پذیرفته است. نتایج حاصل شده نسبت به نمونه‌های تقویت نشده مشابه مقایسه گردیده است.

ابتدا نتایج مربوط به تحلیل ستون کوتاه S-COL ارائه گردیده است. شکل ۲۱ رفتار محوری ستون تقویت شده در حالت چیدمان مختلف ورق GFRP بر روی لبه‌های ستون را نسبت به نمونه تقویت نشده (Bare column) نشان می‌دهد. با توجه تعدد نمونه‌ها تنها به ذکر نتایج مربوط به تقویت با ورق GFRP به ضخامت ۱۵/۵mm بسنده شده و نتایج کلی مربوط به سایر ضخامت‌های ورق GFRP در جدول ۸ آورده شده است.

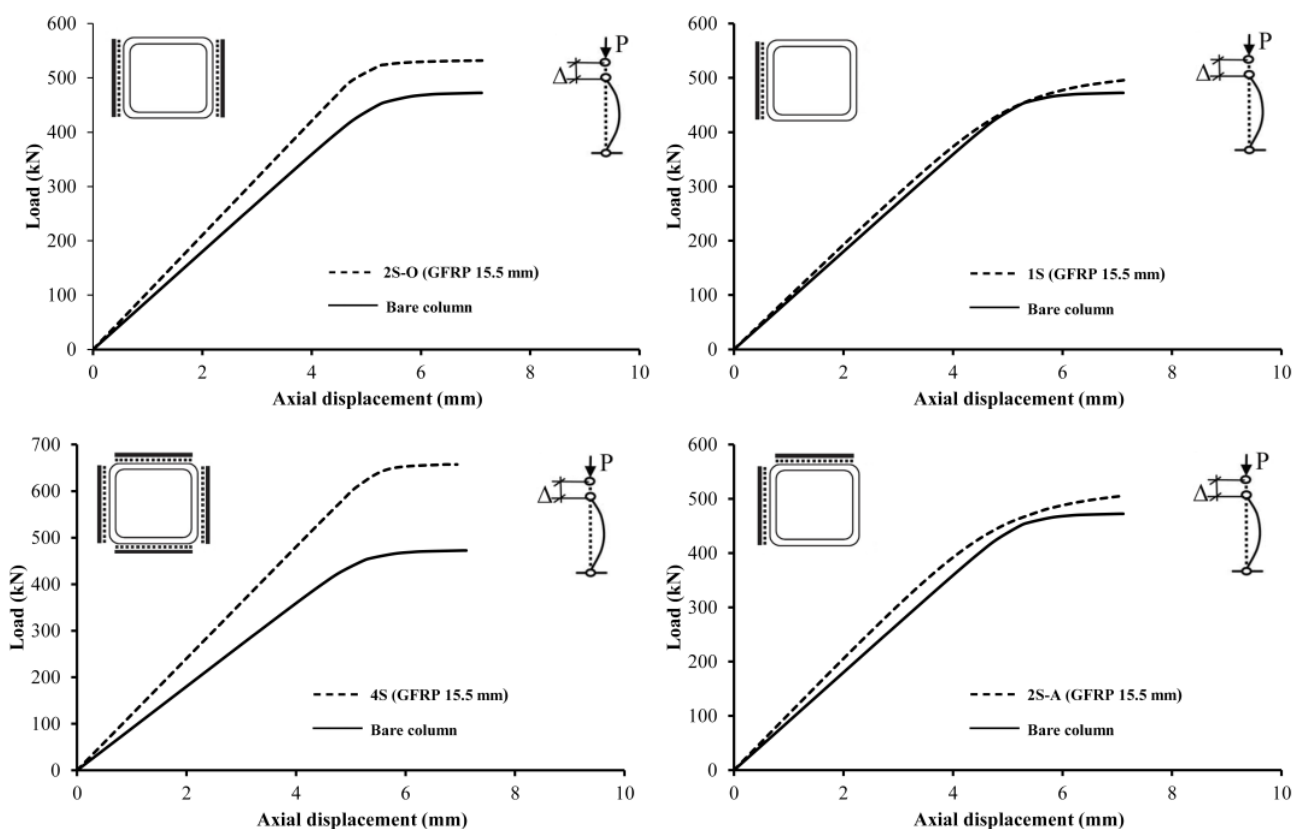


شکل ۲۱: - نمودار بار- تغییر مکان محوری نمونه S-COL در حالت‌های مختلف چیدمان ورق GFRP

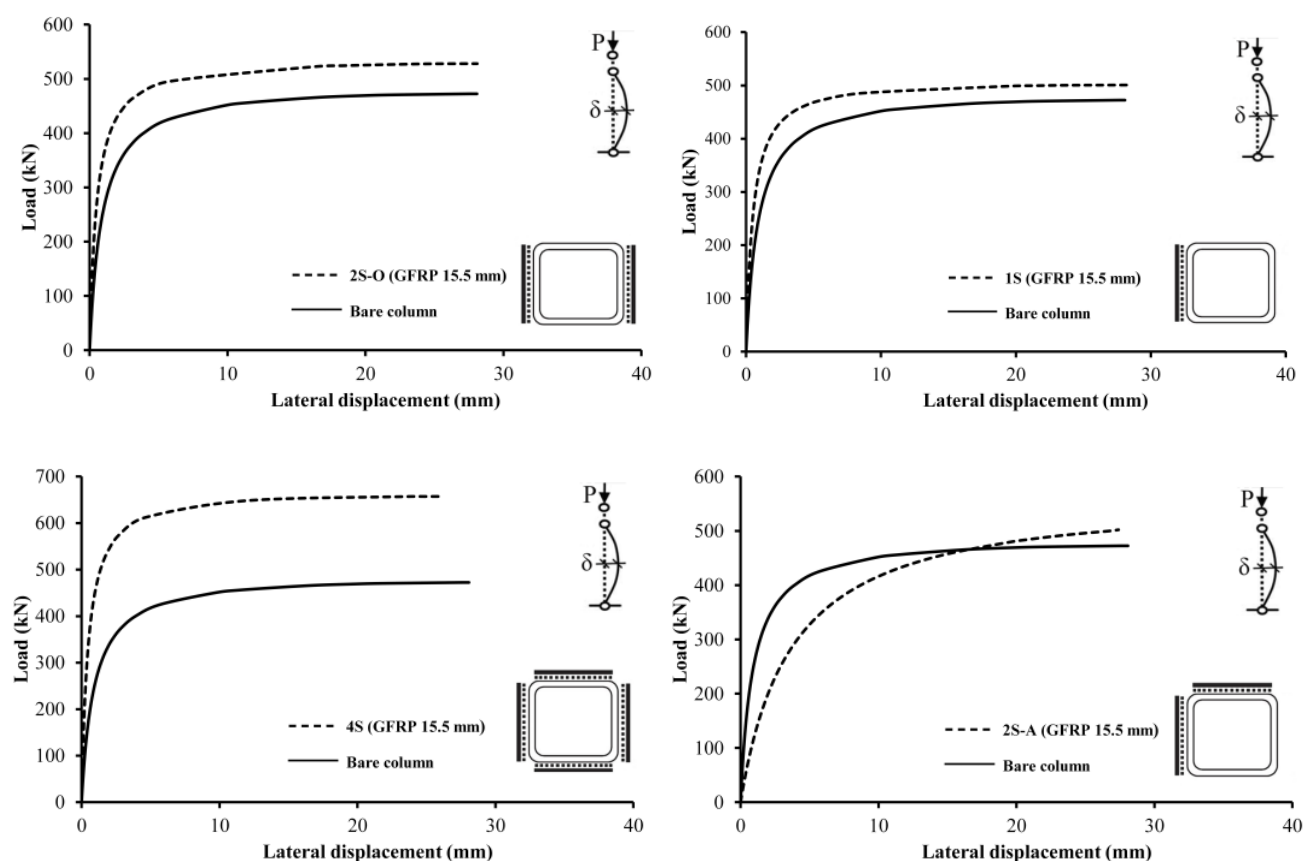
نتایج نشان می‌دهد می‌توان از طریق تقویت ستون با ورق GFRP با افزایش سختی محوری ستون، ظرفیت حمل بار محوری آن را افزایش داد. بالاترین میزان افزایش بار نهایی در محدوده ۱۰/۱۰۸٪ تا ۱۲۵/۷۷٪ و بالاترین میزان افزایش سختی محوری در محدوده ۲۹/۷۸٪ تا ۵۱/۵۸٪ برای حالتی که از ورق GFRP با ضخامت‌های مختلف برای پوشاندن تمامی لبه‌های ستون استفاده گردید به ثبت رسید. همچنین در حالت چیدمان ورق با ضخامت مختلف بر روی یک لبه ستون کمترین میزان افزایش بار نهایی و سختی محوری به ترتیب در محدوده ۱۲/۶۷٪ تا ۱۶/۶۱٪ و ۱۵/۴۲٪ تا ۱۹/۵٪ ارزیابی گردید.

موقعیت قرار گیری ورق GFRP نیز در رفتار ستون‌ها تاثیر گذار است. مطابق انتظار بهترین حالت تقویت ستون، پوشاندن تمامی لبه‌ها به وسیله ورق GFRP می‌باشد. همچنین تاثیر چیدمان ورق GFRP در دو لبه موازی ستون به مراتب بیشتر از حالت چیدمان در دو لبه کنار هم ارزیابی گردید. دلیل این امر را می‌توان محدود نمودن بیشتر و الزام به کماتش موضعی در دو لبه موازی ستون در حالت اول دانست. تاثیر ورق GFRP نیز در افزایش مقاومت محوری ستون‌ها با افزایش ضخامت آن‌ها افزایش می‌یابد. البته تاثیر افزایش ضخامت ورق GFRP در بهبود رفتار ستون برای چیدمان مختلف ورق GFRP، متفاوت ارزیابی گردید. تاثیر افزایش ضخامت ورق GFRP در دو حالت چیدمان ورق بر روی یک لبه و دو لبه مجاور ستون به مراتب کمتر از دو حالت دیگر محاسبه شد.

شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان دهنده عملکرد محوری و جانبی ستون L-COL تقویت شده در حالت چیدمان مختلف ورق GFRP به ضخامت 15.5mm نسبت به نمونه تقویت نشده می‌باشند. نتایج کلی در جدول ۸ آورده شده است. نتایج برای تمامی نمونه‌های تقویت شده حاکی از افزایش سختی محوری نمونه‌ها بسته به موقعیت قرارگیری ورق GFRP و ضخامت آن بوده است. برای مدل‌های تقویت شده، سختی جانبی نیز افزایش پیدا کرده است. تنها زمانی که از ورق GFRP برای تقویت دو لبه مجاور استفاده گردید، با وجود افزایش ظرفیت کماتش، به دلیل نامتقارنی ایجاد شده سختی جانبی کاهش پیدا کرد.



شکل ۲۲: - نمودار بار- تغییر مکان محوری نمونه L-COL در حالت‌های مختلف چیدمان ورق GFRP



شکل ۲۳: - نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه L-COL در حالت‌های مختلف چیدمان ورق GFRP

برای ستون‌های بلند تقویت شده با مقطع توخالی، بالاترین میزان افزایش بار نهایی و سختی محوری به ترتیب در محدوده ۲۲/۳۹٪ تا ۴۴/۹۹٪ و ۲۰/۵۴٪ تا ۴۰/۳۱٪ در حالت چیدمان GFRP با ضخامت‌های مختلف بر روی تمامی لبه‌ها به ثبت رسید. در حالت چیدمان ورق بر روی یک لبه نیز کمترین میزان افزایش بار نهایی و سختی محوری به ترتیب در محدوده ۲/۸۵٪ تا ۵/۶۲٪ و ۳/۹۴٪ تا ۶/۱۵٪ ارزیابی گردید. بر خلاف نتایج بدست آمده برای ستون‌های کوتاه، تاثیر چیدمان ورق GFRP در دو لبه مجاور ستون به مراتب بیشتر از حالت چیدمان در دو لبه موازی ارزیابی گردید. موثر بودن ورق GFRP در بهبود رفتار کمانشی ستون‌های قوطی شکل بلند نیز با افزایش ضخامت آن‌ها افزایش یافت. بر خلاف نتایج حاصل شده برای ستون‌های کوتاه، تاثیر افزایش ضخامت GFRP در حالت چیدمان بر روی تمامی لبه‌ها بیشتر از سایر حالات ارزیابی گردید.

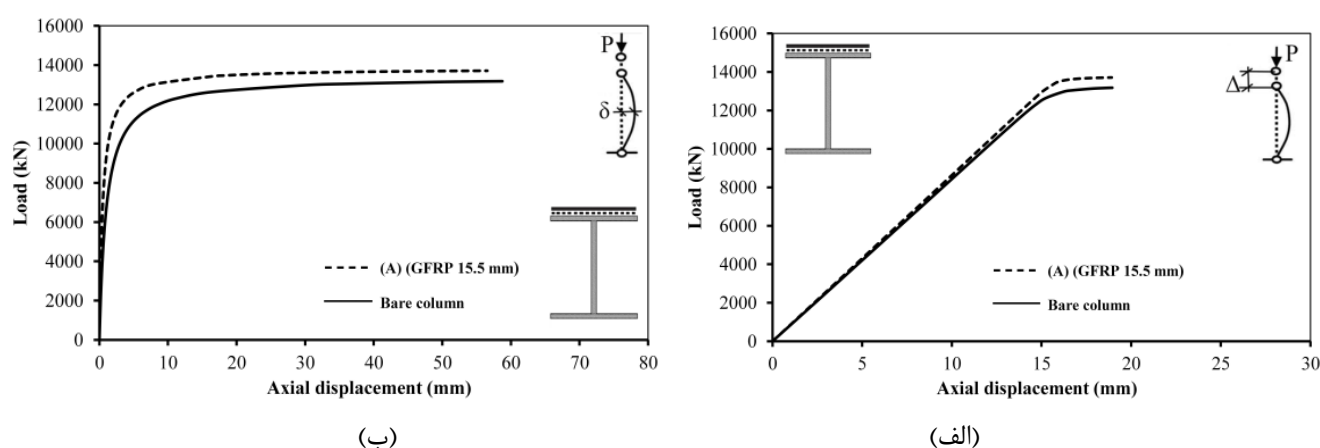
جدول ۸: خلاصه نتایج تحلیلی المان محدود نمونه‌های S-COL و L-COL

حالت چیدمان	ضخامت GFRP (mm)	S-COL				L-COL			
		بار نهایی (kN)	درصد افزایش	سختی محوری (kN/mm)	درصد افزایش	بار نهایی (kN)	درصد افزایش	سختی محوری (kN/mm)	درصد افزایش
تقویت نشده	-	۲۴۳	-	۵۴۱	-	۴۹۲	-	۸۶	-
1S	۹/۵	۲۷۴	۱۲/۶۷	۶۲۴/۴	۱۵/۴۲	۵۰۶	۲/۸۵	۹۳/۸	۳/۹۴
	۱۲/۵	۲۸۲	۱۶/۱۱	۶۳۲/۵	۱۶/۹۱	۵۱۰	۳/۷۳	۹۴/۶	۴/۸۷
	۱۵/۵	۲۸۳	۱۶/۴۲	۶۳۹/۴	۱۸/۱۸	۵۱۵	۴/۶۰	۹۵/۲	۵/۵۱
	۱۹	۲۸۴	۱۶/۶۱	۶۴۶/۵	۱۹/۵۰	۵۲۰	۵/۶۲	۹۵/۷	۶/۱۵

2S-O	۹/۵	۳۸۰	۵۶/۲۹	۶۵۶/۷	۲۱/۴۰	۵۱۹	۵/۵۸	۹۷/۷	۸/۳۳
	۱۲/۵	۳۹۴	۶۲/۲۰	۶۷۵/۱	۲۴/۷۸	۵۲۸	۷/۳۲	۱۰۱/۴	۱۲/۴۶
	۱۵/۵	۴۰۶	۶۶/۷۹	۶۹۱/۸	۲۷/۸۸	۵۳۶	۹/۰۵	۱۰۴/۷	۱۶/۰۲
	۱۹	۴۱۷	۷۱/۳۹	۷۰۹/۹	۳۱/۲۲	۵۴۶	۱۱/۰۷	۱۰۸/۱	۱۹/۸۲
2S-A	۹/۵	۳۱۲	۲۸/۲۲	۶۵۲/۳	۲۰/۵۷	۵۴۳	۱۰/۴۰	۹۷/۸	۸/۴۳
	۱۲/۵	۳۱۶	۲۹/۸۶	۶۷۱/۲	۲۴/۰۷	۵۵۸	۱۳/۳۹	۹۹/۷	۱۰/۵۱
	۱۵/۵	۳۱۸	۳۰/۶۵	۶۸۸/۳	۲۷/۲۳	۵۷۲	۱۶/۲۸	۱۰۱	۱۲/۰۱
	۱۹	۳۲۰	۳۱/۴۳	۷۰۶/۶	۳۰/۶۲	۵۸۸	۱۹/۵۴	۱۰۲/۶	۱۳/۷۴
4S	۹/۵	۴۸۹	۱۰۱/۰۸	۷۰۲/۱	۲۹/۷۸	۶۰۲	۲۲/۳۹	۱۰۸/۷	۲۰/۵۴
	۱۲/۵	۵۰۶	۱۰۸/۱۲	۷۴۳/۵	۳۷/۴۳	۶۳۷	۲۹/۴۸	۱۱۴/۵	۲۶/۹۳
	۱۵/۵	۵۲۲	۱۱۴/۷۸	۷۷۸/۸	۴۳/۹۵	۶۷۲	۳۶/۶۲	۱۲۰	۳۳/۰۴
	۱۹	۵۴۹	۱۲۵/۷۷	۸۲۰/۱	۵۱/۵۸	۷۱۳	۴۴/۹۹	۱۲۶/۶	۴۰/۳۱

برای ستون‌های کوتاه قوطی شکل S-COL حالات شکست مختلفی با توجه به چیدمان ورق GFRP به ثبت رسید. زمانی که ستون در تمامی لبه‌ها تقویت شده بود، حالت شکست به صورت گسیختگی چسب و جدا شدن ورق GFRP در نواحی انتهایی نزدیک به تکیه‌گاه ستون به ثبت رسید. در سایر نمونه‌ها، حالت شکست به صورت کمانش موضعی در لبه‌های تقویت نشده مشاهده شد. حالات کمانش ذکر شده در مقابل حالت کمانش ستون کوتاه تقویت نشده که به صورت کمانش موضعی متقارن، به گونه‌ای که دو لبه روبرو کمانش داخلی و دو لبه دیگر کمانش خارجی کنند، نشان از تغییر حالت کمانش می‌باشد. در تمامی ستون‌های بلند تقویت شده با مقطع توخالی، شکست ناشی از کمانش کلی به دنبال کمانش موضعی نزدیک میانه ارتفاع ستون مشاهده شد. بنابراین برای ستون بلند، تغییر حالت کمانش رخ نداده است.

در ادامه نتایج کلی مربوط به تحلیل کمانشی و استاتیکی نمونه‌های تقویت شده IPB 240 و I-COL در جدول ۹ نمایش داده شده است. شکل ۲۴ نتایج تحلیل مدل IPB240 در حالت چیدمان ورق GFRP بر روی یک بال رانشان می‌دهد.



شکل ۲۴: نمودار بار- تغییر مکان نمونه IPB240 در حالت چیدمان ورق GFRP بر روی یک بال (الف) تغییر مکان محوری (ب) تغییر مکان جانبی

جدول ۹: خلاصه نتایج تحلیلی المان محدود نمونه‌های IPB240 و I-COL

حالت چیدمان	ضخامت GFRP (mm)	IPB 240				I-COL			
		بار نهایی (kN)	درصد افزایش	سختی محوری (kN/mm)	درصد افزایش	بار نهایی (kN)	درصد افزایش	سختی محوری (kN/mm)	درصد افزایش
تقویت نشده	-	۱۳۱۰۳	-	۸۶۴	-	۲۷۱۶	-	۳۶۰	-
(A)	۹/۵	۱۳۳۵۱	۱/۸۹	۸۶۴/۶	۰/۰۷	۲۸۲۱	۳/۸۸	۳۶۷/۳	۲/۰۳
	۱۲/۵	۱۳۴۲۷	۲/۴۷	۸۶۵/۳	۰/۱۵	۲۸۵۵	۵/۱۰	۳۷۰/۳	۲/۸۶
	۱۵/۵	۱۳۵۰۳	۳/۰۵	۸۶۶/۱	۰/۲۴	۲۸۸۸	۶/۳۲	۳۷۳/۲	۳/۶۷
	۱۹	۱۳۵۹۱	۳/۷۲	۸۶۷	۰/۳۵	۲۹۲۶	۷/۷۴	۳۷۶/۲	۴/۵۰
(B)	۹/۵	۱۳۶۰۹	۳/۸۶	۸۸۱/۱	۱/۹۷	۲۹۲۹	۷/۸۳	۳۷۷/۴	۴/۸۳
	۱۲/۵	۱۳۷۶۸	۵/۰۸	۸۹۰/۲	۳/۰۱	۲۹۹۶	۱۰/۳۲	۳۸۳/۵	۶/۵۳
	۱۵/۵	۱۳۹۲۸	۶/۳۰	۸۹۸/۴	۳/۹۴	۳۰۶۴	۱۲/۸۲	۳۸۹/۰	۸/۰۶
	۱۹	۱۴۱۱۵	۷/۷۲	۹۰۷/۱	۴/۹۸	۳۱۴۴	۱۵/۷۵	۳۹۶/۰	۱۰
(C)	۹/۵	۱۳۱۰۴	۰/۰۱	۸۶۴	۰	۲۷۱۹	۰/۱۳	۳۸۱/۵	۵/۹۷
	۱۲/۵	۱۳۱۰۵	۰/۰۲	۸۶۴	۰	۲۷۲۴	۰/۳۰	۳۸۴/۴	۶/۷۸
	۱۵/۵	۱۳۱۰۶	۰/۰۲	۸۶۴	۰	۲۷۲۹	۰/۴۷	۳۸۷/۲	۷/۵۶
	۱۹	۱۳۱۰۸	۰/۰۳	۸۶۴	۰	۲۷۳۳	۰/۶۴	۳۹۰/۵	۸/۴۶

نتایج نشان می‌دهد، با بکارگیری ورق GFRP در تقویت بال ستون I شکل می‌توان با افزایش سختی محوری و جانبی، ظرفیت کمانش را افزایش داد. در حالت چیدمان ورق بر روی جان، به دلیل آن که ممان اینرسی مقطع حول محور ضعیف افزایش چندانی نداشته است، نتایج تغییر محسوسی نسبت به نمونه تقویت نشده نشان نمی‌دهند. حالت شکست مشاهده شده به صورت کمانش کلی نمونه مشاهده شد و هیچ نوع گسیختگی پیش از موعدی در چسب یا ورق GFRP به ثبت نرسید.

برای نمونه‌های IPB 240 مورد مطالعه، بیشترین افزایش بار نهایی و سختی محوری به ترتیب ۷/۷۲٪ و ۴/۹۸٪ برای حالتی ارزیابی گردید که از ورق GFRP با ضخامت ۱۹mm برای پوشاندن هر دو بال استفاده شد. نتایج نمونه‌های I-COL نیز نشان می‌دهد، زمانی که از ورق GFRP با ضخامت ۱۹mm برای پوشاندن هر دو بال استفاده شد، بیشترین افزایش بار نهایی و سختی محوری به ترتیب ۱۵/۷۵٪ و ۱۰٪ بدست آمد که بیشتر از مقادیر ارزیابی شده مشابه برای نمونه‌های IPB240 می‌باشد. بنابراین در نمونه‌های I شکلی که اجزای سطح مقطع آن از نسبت پهنا به ضخامت بالاتری برخوردار باشند، ورق GFRP تاثیر بیشتری بر بهبود رفتار محوری و جانبی خواهد داشت. این مطلب حتی برای حالت چیدمان GFRP بر روی جان که کمترین میزان افزایش ظرفیت کمانش برای آن به ثبت رسیده است، به وضوح قابل مشاهده است. در این حالت چیدمان برای نمونه‌های IPB240 تغییر محسوسی در افزایش سختی محوری مشاهده نگردید، حال آن که نتایج تحلیل نمونه‌های I-COL با افزایش نسبت پهنا به ضخامت جان حاکی از افزایش ۸/۴۶٪ در سختی محوری نمونه تقویت شده با ضخامت ۱۹mm می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

استفاده از کامپوزیت GFRP در تقویت ورق فولادی موجب افزایش سختی و ظرفیت حمل بار آن می‌گردد. برای صفحات فولادی با نسبت پهنا به ضخامت بالاتر، تاثیر ورق GFRP در افزایش ظرفیت حمل بار نمونه به مراتب بیشتر ارزیابی گردید. اثر بخشی ورق GFRP نیز با افزایش ضخامت آن بیشتر می‌شود.

برای هر دو صفحات فولادی تقویت نشده و تقویت شده، پارامتر λ به عنوان نسبت ظرفیت سیستم با ناکاملی هندسی اولیه به ظرفیت سیستم بدون نقص، با افزایش مقدار ناکاملی هندسی اولیه کاهش می‌یابد. در این میان صفحات فولادی تقویت نشده با نسبت پهنا به ضخامت بالاتر از حساسیت بیشتری نسبت به مقدار ناکاملی هندسی اولیه برخوردارند. برای این نوع صفحات می‌توان از طریق تقویت با ورق GFRP نه تنها ظرفیت حمل بار را بهبود بخشید بلکه می‌توان میزان حساسیت آن‌ها نسبت به مقادیر مختلف نقص هندسی اولیه را کاهش داد.

با استفاده از ورق GFRP در تقویت تیر I شکل می‌توان ظرفیت حمل بار تیر را افزایش داد. در این روش مقاوم سازی، با قرار گیری ورق GFRP بر روی بال تیر نتایج بهتری نسبت به حالت چیدمان ورق بر روی جان حاصل می‌گردد. برای نمونه‌های مورد مطالعه، تاثیر ورق GFRP در افزایش ظرفیت حمل بار تیر یک سر گیردار کمتر از نمونه دو سر مفصلی ارزیابی گردید.

برای ستون کوتاه با مقطع قوطی شکل می‌توان از طریق تقویت ستون به وسیله ورق‌های GFRP با افزایش سختی محوری ستون، ظرفیت حمل بار محوری آن را افزایش داد. همچنین نتایج نشان می‌دهد موقعیت قرار گیری ورق GFRP نیز در رفتار کمانشی ستون‌ها تاثیر گذار است. بالاترین میزان افزایش بار نهایی در محدوده ۱۰۱/۰۸٪ تا ۱۲۵/۷۷٪ و بالاترین میزان افزایش سختی محوری در محدوده ۲۹/۷۸٪ تا ۵۱/۵۸٪ برای حالتی که از ورق GFRP با ضخامت‌های مختلف برای پوشاندن تمامی لبه‌های ستون استفاده گردید به ثبت رسید. همچنین تاثیر چیدمان ورق GFRP در دو لبه موازی ستون به مراتب بیشتر از حالت چیدمان در دو لبه کنار هم ارزیابی گردید.

استفاده از ورق GFRP در تقویت ستون‌های قوطی شکل بلند نیز منجر به افزایش ظرفیت کمانش می‌شود. برای نمونه‌های مورد بررسی، بالاترین میزان افزایش بار نهایی در محدوده ۲۲/۳۹٪ تا ۴۴/۹۹٪ و بالاترین میزان افزایش سختی محوری در محدوده ۲۰/۵۴٪ تا ۴۰/۳۱٪ برای حالتی که از ورق GFRP با ضخامت‌های مختلف برای پوشاندن تمامی لبه‌های ستون استفاده گردید به ثبت رسید. برای ستون‌های قوطی شکل بلند مورد مطالعه تاثیر چیدمان ورق GFRP در دو لبه مجاور ستون به مراتب بیشتر از حالت چیدمان در دو لبه موازی می‌باشد.

برای ستون‌های با مقطع I شکل، استفاده از ورق‌های GFRP در تقویت بال ستون منجر به افزایش سختی محوری و جانبی ستون گردیده و ظرفیت کمانش آن را افزایش می‌دهد. در حالت چیدمان ورق بر روی جان مقطع، نتایج تغییر محسوسی نسبت به نمونه تقویت نشده نشان نمی‌دهد. برای نمونه‌های IPB 240 مورد مطالعه، بیشترین افزایش بار نهایی ۷/۷۲٪ و بالاترین میزان افزایش سختی محوری ۴/۹۸٪ ارزیابی گردید. مقادیر مشابه برای نمونه‌های I-COL با مقطع لاغرتر به ترتیب برابر ۱۵/۷۵٪ و ۱۰٪ بدست آمد. بنابراین در ستون‌های با مقطع I شکلی که اجزای سطح مقطع آن از نسبت پهنا به ضخامت بالاتری برخوردار باشند، ورق GFRP تاثیر بیشتری بر بهبود رفتار محوری و جانبی ستون خواهد داشت.

موثر بودن ورق GFRP در بهبود رفتار کمانشی ستون‌های فولادی نیز با افزایش ضخامت ورق افزایش می‌یابد. بهترین نتایج برای تقویت ستون‌ها زمانی حاصل می‌گردد که از ورق GFRP با بالاترین ضخامت در مقطع ستون استفاده شود. همچنین، با استفاده از ورق‌های GFRP در تقویت ستون‌های قوطی شکل نتایج بهتری نسبت به ستون‌های I شکل حاصل می‌گردد. با توجه استفاده گسترده از مقاطع قوطی شکل در سازه‌های فولادی، روش تقویت با کامپوزیت‌های FRP در تقویت این ستون‌ها را می‌توان بسیار سودمند ارزیابی نمود.

مراجع

- [1] Bekey, S., Peng, F., Lieping, Y. (2011). "Experimental Study on Behavior of FRP Anti-Buckling Strengthening Steel Members", *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, pp. 919–924.
- [2] Shaat, A., Schnerch, D., Fam, A., Rizkalla, R. (2004). "Retrofit of Steel Structures Using Fiber Reinforced Polymers: State-of-the-Art", Transportation Research Board, Report 04-4063.
- [3] Accord, N.B., Earls, C.J. (2006). "Use of Fiber-Reinforced Polymer Composite Elements to Enhance Structural Steel Member Ductility", *Composites For Construction*, Vol. 10, pp. 337–344.
- [4] Harries, K.A., Peck, A.J., Abraham, E.J. (2009). "Enhancing Stability of Structural Steel Sections Using FRP", *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, pp. 1092–1101.
- [5] Shaat, A., Fam, A.Z. (2009). "Slender Steel Columns Strengthened Using High-Modulus CFRP Plates for Buckling Control", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 13, pp. 2–12.
- [6] Linghoff, D., Al-Emrani, M., Klinger, R. (2010) "Performance of Steel Beams Strengthened with CFRP Laminate – Part 1: Laboratory Tests", *Composites: Part B: Engineering*, Vol. 41, pp. 509–515.
- [7] Narmashiri, K., RamliSulong, N.H., Jumaat, M.Z. (2012) "Failure Analysis and Structural Behaviour of CFRP Strengthened Steel I-beams", *Construction and Building Materials*, Vol. 30, pp.1–9.
- [8] El-Tawil, S., Ekiz, E., Goel, S., Chao, S.H. (2011) "Retraining Local and Global Buckling Behavior of Steel Plastic Hinges Using CFRP", *Constructional Steel Research*, Vol.67, pp. 261–269.
- [9] Teng, J.G., Yu, T., Fernando, D. (2012). "Strengthening of Steel Structures with Fiber-Reinforced Polymer Composites", *Constructional Steel Research*, Vol. 78, pp. 131–143.
- [10] Park, J.W., Yeom, H.J., Yoo, J.H. (2013). "Axial Loading Tests and FEM Analysis of Slender Square Hollow Section (SHS) Stub Columns Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymers", *Steel Structures*, Vol. 13, pp. 731–743.
- [11] Siddique, M.A.A., El Damatty, A.A. (2013). "Improvement of Local Buckling Behaviour of Steel Beams Through Bonding GFRP Plates", *Composite Structures*, Vol. 96, pp. 44–56.
- [12] Teng, J.G., Fernando, D., Yu, T. (2015). "Finite Element Modelling of Debonding Failures in Steel Beams Flexurally Strengthened with CFRP Laminates", *Engineering Structures*, Vol. 86, pp. 213–224.
- [13] Siddique, M.A.A., El Damatty, A.A. (2012). "Enhancement of Buckling Capacity of Steel Plates Strengthened with GFRP Plates", *Thin-Walled Structures*, Vol. 60, pp. 154–162.
- [14] El Damatty, A.A., Abushagur, M. (2003). "Testing and Modeling of Shear and Peel Behavior for Bonded Steel/FRP Connections". *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, pp. 987–1003.
- [15] ABAQUS standard user's manual, Version 6.11,(2011).